

Estudio y modelado de sistemas de recuperación de potencia en motores de inducción de rotor devanado.

TRABAJO FINAL DE GRADO



Facultad Náutica de Barcelona
Universidad Politécnica de Cataluña

Trabajo realizado por:
Dionisio Rodríguez Altamirano

Dirigido por:
Pau Casals Torrens

Grado:
Ingeniería en sistemas y tecnología naval

Barcelona, 4/10/2019

Departamento de Ciencias e Ingeniería Náutica



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Facultat de Nàutica de Barcelona

Agradecimientos

Me gustaría, primero agradecer a mi tutor Pau Casals Torrens, por su ayuda a lo largo de este proyecto, agradecer a todos los profesores de la Facultad de Náutica de Barcelona, por la excelente tarea que están realizando en la formación de profesionales.

Dar las gracias a mis compañeros de estudio, ya que con su ayuda ha sido más fácil sobrellevar mis estudios.

También y no menos importante, dar las gracias a mi familia, por su eterno apoyo.

He de decir que he disfrutado y aprendido mucho, para mí ha sido un gran reto, la realización de este proyecto.

Resumen

El objetivo de este trabajo, es estudiar las ventajas y aplicaciones de diferentes sistemas de control de velocidad y de recuperación de energía en motores de inducción, con rotor devanado.

El trabajo, empieza con una introducción a las máquinas asíncronas, explicando los tipos, los detalles constructivos y el funcionamiento, se realiza un recorrido por los usos del motor en la industria actual. Se explica los elementos de control electrónico empleados en el trabajo, el funcionamiento y las características.

En el cuerpo del trabajo, se realiza un estudio exhaustivo de los diferentes sistemas de control, mediante el simulador *Simulink (Matlab)*, los resultandos se analizan y corroboran, mediante las ecuaciones analíticas que relacionan el modelo físico con el sistema. Los resultados obtenidos se comparan entre los diferentes sistemas.

En el cierre se explican las ventajas y desventajas de cada sistema.

Abstract

The objective of this work is to study the advantages and applications of different speed control and energy recovery systems in induction motors, with winding rotor.

The work begins with an introduction to asynchronous machines, explaining the types, construction details and operation, a tour of the uses of the engine in the current industry. The electronic control elements used in the work, operation and characteristics are explained.

In the body of the work, an exhaustive study of the different control systems is carried out, using the Simulink (Matlab) simulator, the results are analyzed and corroborated, using the analytical equations that relate the physical model to the system. The results obtained are compared between the different systems.

The closure explains the advantages and disadvantages of each system.

Tabla de contenidos

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
TABLA DE CONTENIDOS	VI
LISTADO DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS	VIII
LISTADO DE FIGURAS	X
LISTADO DE TABLAS	XIV
<u>1 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</u>	<u>1</u>
1.1 DESARROLLO DE LA IDEA	1
1.2 MOTIVACIONES	1
1.3 OBJETIVOS	2
<u>2 CAPÍTULO 2. MÁQUINA ASÍNCRONA.</u>	<u>3</u>
2.1 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS	3
2.2 APLICACIONES DE LOS MOTORES DE ROTOR DEVANADO (ANILLOS DESLIZANTES) EN LA INDUSTRIAL ACTUAL	4
2.3 FUNCIONAMIENTO	6
2.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DE MOTOR ASÍNCRONO, POR FASE	9
2.5 BALANCE DE POTENCIA	10
2.6 PAR DE TORSIÓN	12
<u>3 CAPÍTULO 3. PUENTE RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE 6 DIODOS, NO CONTROLADO.</u>	<u>14</u>
3.1 FUNCIONAMIENTO DEL PUENTE RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE 6 DIODOS, NO CONTROLADO.	14
<u>4 CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE MODELOS DE ESTUDIO MEDIANTE SIMULINK (MATLAB).</u>	<u>17</u>
4.1 MOTOR CON ROTOR DEVANADO EN CORTOCIRCUITO.	18
4.1.1 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR	18
4.1.2 CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE ARRANQUE	19
4.1.3 PAR DE TORSIÓN DE LA MÁQUINA	21
4.1.4 BALANCE DE POTENCIAS DEL MOTOR	26
4.1.5 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR EN CONDICIÓN DE VACÍO Y EN CONDICIÓN DE CARGA.	30

4.2	REGULACIÓN DE VELOCIDAD MEDIANTE REÓSTATO ESCALONADO.	36
4.2.1	CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE ARRANQUE.	40
4.2.2	PAR DE TORSIÓN DE LA MÁQUINA	42
4.2.3	BALANCE DE POTENCIA DEL SISTEMA	48
4.3	REGULACIÓN DE VELOCIDAD POR CONTROL ESTÁTICO.	52
4.3.1	CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE ARRANQUE.	57
4.3.1	PAR DE TORSIÓN DE LA MÁQUINA	60
4.3.2	BALANCE DE POTENCIA DEL SISTEMA	62
4.3.3	COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS DE REGULACIÓN	64
4.4	REGULACIÓN DE VELOCIDAD PARA LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA.	66
4.4.1	COMPORTAMIENTO DEL MOTOR FRENTE A LA BATERÍA	68
4.4.2	ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS, DESDE EL PUNTO DE VISTA DE “VARIACIÓN DE TENSIÓN”	70
4.4.3	ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE “VARIACIÓN DE RESISTENCIA”	77
4.4.4	CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE ARRANQUE.	80
4.4.5	CÁLCULO DEL PAR DE ARRANQUE.	82
4.4.6	BALANCE DE POTENCIA DEL SISTEMA.	84
5	ESTUDIO ECONÓMICO	87
6	CONCLUSIONES	89
7	BIBLIOGRAFIA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
8	WEBGRAFÍA	92
9	ANEXOS	93

Listado de siglas y acrónimos

❖ e	Tensión inducida (V).
❖ N	Número de espiras en la bobina.
❖ $\Delta\phi$	Variación del flujo en el interior de la bobina (Wb).
❖ Δt	Intervalo de tiempo durante el que varía el flujo (s).
❖ I	Intensidad de la corriente (A).
❖ L	Longitud del conductor (m)
❖ B	Densidad del flujo magnético (T).
❖ F	Fuerza (N).
❖ n	Número de pares de polos del motor.
❖ p	Polo del motor.
❖ f_s	Frecuencia del estator (Hz)
❖ f_r	Frecuencia del rotor (Hz)
❖ ns	Velocidad de sincronismo (r.p.m).
❖ nr	Velocidad del rotor (r.p.m).
❖ s	Deslizamiento.
❖ ω_s	Velocidad angular de sincronismo (rad/s).
❖ ω_r	Velocidad angular del rotor (rad/s).
❖ $f.e.m.$	Fuerza electromotriz inducida (V)
❖ E_1	Fuerza electromotriz inducida en el estator (V).
❖ E_2	Fuerza electromotriz inducida en el rotor (V).
❖ E'_2	Tensión reducida del rotor al estator (V).
❖ I_1	Intensidad del rotor (A).
❖ I'_2	Intensidad del estator (A).
❖ R_1	Resistencia del estator (Ω).
❖ X_1	Reactancia del estator (Ω).
❖ R'_2	Resistencia del rotor (Ω).
❖ R'_c	Efecto de carga (Ω).
❖ X'_2	Reactancia del rotor (Ω).
❖ R_{Fe}	Efecto de disipación en el hierro (Ω).
❖ X_m	Reactancia del efecto de magnetización del hierro (Ω).
❖ R'_2/s	Efecto de la velocidad sobre la resistencia del rotor (Ω).
❖ Pe	Potencia eléctrica de entrada al motor (W).
❖ P_{cu2}	Pérdidas en forma de calor en el rotor (W).
❖ P_{fe}	Pérdidas producidas en hierro (W).
❖ P_{cu2}	Pérdidas en forma de calor en el rotor (W).
❖ P_t	Potencia transferida al estator (W).
❖ P_{mi}	Potencia mecánica interna (W).
❖ $P_{érd Mec}$	Potencia mecánica interna (W).

❖ P_u	Potencia útil (W).
❖ η	Rendimiento.
❖ T	Par de torsión (Nm).
❖ T_u	Par útil (Nm).
❖ V_{th}	Tensión de Thévenin (V).
❖ R_{th}	Resistencia de Thévenin (V).
❖ X_{th}	Reactancia de Thévenin (V).
❖ T_{max}	Par máximo (Nm).
❖ s_{max}	Deslizamiento máximo.
❖ fp	Factor de potencia.
❖ $r. m. s.$	Valor eficaz.
❖ Radicional1.	Resistencia de carga en sistema de reóstato escalonado (Ω).
❖ Radicional2	Resistencia de carga en sistema de control estático (Ω).
❖ Prad1	Pérdidas en forma de calor en Radicional1 (W).
❖ Prad2	Pérdidas en forma de calor en Radicional2 (W).
❖ V_{cc}	Tensión en corriente continua (V).
❖ I_{cc}	Intensidad en corriente continua (A).
❖ E_{oc}	Tensión de vacío en circuito abierto del motor (V)
❖ E_{bat}	Tensión de la batería (V).

Listado de Figuras

Figura 2.1 Motor asíncrono de jaula de ardilla.[3]	3
Figura 2.2 Motor asíncrono de rotor devanado, con anillos deslizantes. [3]	3
Figura 2.3 Molino de bolas empleado para la trituration de mineral [1]	4
Figura 2.4 Hornos de cemento, cortesía de Xinhai mineral processing EPC [2]	4
Figura 2.5 Motor de horno de cemento, con sistema motorizado de escobillas[3].	5
Figura 2.6. Sistema mecánico conexión y desconexión de escobillas [3].	5
Figura 2.7 Principio de funcionamiento de un aerogenerador [4]	6
Figura 2.8 Circuito equivalente del motor asíncrono [1].	9
Figura 2.9 Par torsión vs Velocidad [1]	12
Figura 3.1 Ondas de tensión y corriente.[2]	15
Figura 4.1. Motor con rotor devanado en cortocircuito	18
Figura 4.2. Circuito equivalente al modelo del simulador.	19
Figura 4.3 Esquema del modelo simulado, de motor con rotor devanado en cortocircuito.	20
Figura 4.4 Gráfica de Intensidad de arranque con rotor devanado en cortocircuito.	20
Figura 4.5 Intensidad vs Velocidad	21
Figura 4.6. Transformación del modelo equivalente a circuito equivalente de Thévenin.	22
Figura 4.7 Velocidad y deslizamiento del motor con contrapar 100 Nm.	23
Figura 4.8 Par ejercido por el motor con contrapar 128 Nm	24
Figura 4.9 Par ejercido por el motor con contrapar 129 Nm.	24
Figura 4.10 Par desarrollado vs Velocidad, contrapar 0 Nm.	25
Figura 4.11 Potencia activa consumida.	29
Figura 4.12 Velocidad y deslizamiento en condición de vacío.	30
Figura 4.13 Intensidad del rotor en condición de vacío.	30
Figura 4.14 Circuito equivalente del motor en condición de vacío.	31
Figura 4.15 Factor de potencia en condición de vacío.	31
Figura 4.16 Retraso de la intensidad respecto de tensión, para condición de vacío.	32
Figura 4.17 Velocidad y deslizamiento para condición de carga 100 Nm.	32
Figura 4.18 Intensidad de rotor, en condición de carga de 100 Nm.	33

Figura 4.19	Factor de potencia para condición de carga de 100 Nm.	34
Figura 4.20	Retraso de la intensidad respecto de la tensión, con condición de carga de 100 Nm.	34
Figura 4.21	Factor de potencia vs deslizamiento.	35
Figura 4.22.	Esquema del motor con reóstato escalonado.	36
Figura 4.23	Desplazamiento de las curvas par del motor.[1]	37
Figura 4.24.	Modelo equivalente al circuito con reóstato escalonado.	37
Figura 4.25.	Esquema proporcionado por el simulador, regulación de la velocidad del motor, mediante reóstato escalonado.	40
Figura 4.26	Intensidad de arranque con regulación mediante reóstato escalonado.	41
Figura 4.27	Variación de la intensidad con sistema de reóstato escalonado.	42
Figura 4.28	Par motor con contrapar 191,85 Nm.	43
Figura 4.29	Tiempos de conmutación de cada etapa del motor.	45
Figura 4.30	Par de motor, con momento de inercia y coeficiente de rozamiento, reducidos.	46
Figura 4.31	Par vs Velocidad condición de carga 100 Nm.	47
Figura 4.32	Par vs velocidad, condición de carga en vacío.	47
Figura 4.33	Potencia eléctrica consumida por las resistencias del reóstato.	50
Figura 4.34	Potencia eléctrica consumida por el motor para las diferentes etapas del reóstato.	51
Figura 4.35	Velocidad del rotor, para las diferentes etapas del reóstato.	51
Figura 4.36.	Esquema del motor con regulación de velocidad, por control estático.	52
Figura 4.37	Esquema del modelo simulado, para la regulación de velocidad por control estático.	53
Figura 4.38	Tensión de salida E, del rotor.	54
Figura 4.39	Tensión de salida del puente rectificador Vcc.	54
Figura 4.40.	Modelo equivalente al circuito de regulación de velocidad por control de velocidad estático.	57
Figura 4.41	Intensidad de arranque mediante sistema de regulación de velocidad por control estático	59
Figura 4.42	Variación de la intensidad mediante sistema de regulación de velocidad por control estático.	59
Figura 4.43	Par motor con contrapar 188 Nm	60
Figura 4.44	Par vs velocidad, con condición de carga 100 Nm.	61
Figura 4.45.	Esquema del motor con regulación de velocidad para la recuperación de energía.	66
Figura 4.46	Parámetros de la batería.	67
Figura 4.47	Parámetros de la descarga de la batería.	67

Figura 4.48	Modelo simulado, del sistema de regulación de velocidad para la recuperación de energía.	68
Figura 4.49	Intensidad de entrada a la batería.	69
Figura 4.50	Tensión de la batería	69
Figura 4.51	Porcentaje de carga de la batería	70
Figura 4.52	Porcentaje de carga vs deslizamiento.	71
Figura 4.53	Aumento del deslizamiento	72
Figura 4.54	Circuito equivalente	73
Figura 4.55	Incremento de la intensidad de entrada a la batería	74
Figura 4.56	Curvas de carga de una batería a tensión constante e intensidad constante.[5]	74
Figura 4.57	Circuito equivalente para sistema de regulación de la velocidad, para la recuperación de energía.	75
Figura 4.58	Variación de la resistencia interna de la batería	78
Figura 4.59	Par de motor, para condición de vacío.	80
Figura 4.60	Intensidad de arranque en el sistema de control de velocidad, para la recuperación de energía.	81
Figura 4.61	Par motor con condición de carga de 135 Nm.	83
Figura 4.62	Evolución de la potencia de entrada en la batería	85
Figura 4.63	Potencia de entrada al motor, en condición de carga de 100 Nm.	86

Anexo 1

Figura A. 1	Perfil UPN100, Norma UNE 36522:2018	93
Figura A. 2	Tornillos de M-18, 50 mm longitud, calidad 12.[21]	94
Figura A. 3	Plano de motor de 18,5 kW 400 V, 50 Hz, 4 polos[12]	94
Figura A. 4	Dinamo tacométrica para control de velocidad del motor.[19]	95
Figura A. 5	Armario eléctrico de acero, IP 65 1650x600x400, Marca IDE [18]	95
Figura A. 6	Interruptor general de corte omnipolar, con capacidad de corte en carga.[13]	96
Figura A. 7	Contactor 3 polos, 22 kW, AC3, General Eléctric [15].	96
Figura A. 8	Relé térmico de tres polos regulable de 20-25 A, General Eléctric [15].	97
Figura A. 9	Relé de protección en caso de fallo de fase.[13]	97
Figura A. 10	Puente rectificador de la diodos de alta potencia [16].	98
Figura A. 11	Resistencia tubular bobinada 962 W [17].	98

Figura A. 12 Contactor 3 polos 3 kW, AC3, Schneider [14]	99
Figura A. 13 Relé programable Logo de Siemens.[21]	99
Figura A. 14 Ventilador con filtro, IDE, refrigeración de armario.[18]	100
Figura A. 15 Presupuesto de coste de resistencia de carga (cortesía de Ecoemsa) [17].	100

Listado de Tablas

Tabla 3.1 Conmutación de los diodos [5]	16
Tabla 4.1 Parámetros del modelo de motor Simulink	17
Tabla 4.2 Par electromagnético calculado en cada etapa del motor.	44
Tabla 4.3. Puntos de par máximo de motor (Calculados)	46
Tabla 4.4 Valores de velocidad y deslizamiento, para las diferentes etapas.	48
Tabla 4.5 Datos calculados para contrapar 100 Nm.	49
Tabla 4.6 Datos obtenidos del modelo de simulado para contrapar 100 Nm.	49
Tabla 4.7 datos de velocidad y deslizamiento calculados.	62
Tabla 4.8 Datos calculados para contrapar 100 Nm	63
Tabla 4.9 Datos obtenidos del Modelo Simulado para contrapar 100 Nm.	63
Tabla 4.10. Comparativa de los sistemas de regulación	64
Tabla 4.11 Potencias consumidas en el arranque para el sistema de control por reóstato escalonado y estático.	65
Tabla 4.12. Comparación de consumo de potencia eléctrica.	65
Tabla 4.13 Valores calculados de intensidades, deslizamiento y velocidad.	84
Tabla 4.14 Potencias calculadas.	84
Tabla 4.15 Datos obtenidos del modelo simulado.	85

1 Capítulo 1. Introducción

La humanidad se enfrenta a problemas, como la escasez de energía, el costo de su generación y la repercusión medioambiental. El empleo de los sistemas de control y el uso de energía residual, puede paliar los efectos y gestionar con mayor eficiencia los recursos energéticos.

Las tendencias actuales en las tecnologías modernas han impulsado el uso de motores de inducción, la razón son el bajo coste de mantenimiento, su robustez, su fiabilidad y su alto rendimiento.

Gracias a las nuevas herramientas de software, como los simuladores se pueden realizar múltiples ensayos, sin la necesidad realizar inversiones en equipos físicos.

1.1 Desarrollo de la idea

La idea de este proyecto, es el estudio es la regulación de velocidad y recuperación de energía, mediante el uso de motores asíncronos de inducción, con rotor devanado, mediante la herramienta de *software* de modelizado y simulación de sistemas (MATLAB®/Simulink®).

Inicialmente el desarrollo se centra en el empleo de resistencias, conectadas al rotor con el objetivo de mejorar el par de arranque, así como regular la velocidad del rotor. El sistema, se pretende mejorar mediante la implementación de un sistema electrónico, que en este caso se trata de un puente rectificador de 6 impulsos trifásico no controlado y que transforma la corriente continua en alterna, para ejercer un mejor control.

Finalmente se desarrolla un sistema para poder aprovechar la energía del deslizamiento, en vez de malgastarla en forma de calor, mediante la carga de una pequeña batería.

1.2 Motivaciones

Terminé mis estudios de Formación Profesional 2, especializándome en “Electrónica de Telecomunicaciones” en el año 1993, a los 19 años de edad. Ese mismo año empecé a trabajar en una división de mantenimiento, de una de las empresas constructoras, más grandes de este país, no tuve demasiado tiempo para holgazanear. Mis ganas de superación, me llevaron a poderme promocionar dentro de la empresa, pasando por las diferentes categorías, desde la de peón, hasta la actual de encargado, dirigiendo equipos de hasta 40 trabajadores, en contratos de mantenimiento e instalaciones industriales.

Pasados los años, me di cuenta que había tocado techo, que no existían posibilidades de mejorar profesionalmente y que tenía inquietudes de conocimiento.

Así que decidí empezar unos estudios universitarios, en paralelo con mi trabajo. Mi carga familiar me llevo a iniciar los estudios a distancia, empecé en la U.N.E.D., donde muy despacio y con muchas dificultades, fui aprobando algunas asignaturas. Posteriormente, pude disponer de algo de más de

tiempo y poder venir de forma presencial a la facultad. Me inscribí, en la Facultad Náutica, en el Grado de Ingeniería en Sistemas y Tecnología Naval.

Al principio me llamo, mucho la atención el trato personal de esta facultad, pues al poco tiempo, veía que muchos de los profesores me conocían por mi nombre, que al no ser demasiado grande, todos nos conocíamos y que la atención de todo el equipo que forma esta institución, te trataba de una forma amable y personalizada. Este ambiente realmente me encandiló y me ha llevado a disfrutar unos de los mejores años de mi vida.

El haber, trabajado en instalaciones automatizadas, con motores industriales (Font de Montjuïc, Port de Barcelona, etc...), me ha llevado, a querer ampliar mis conocimientos acerca de estos motores y la forma de controlarlos y mejorar su eficiencia energética.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto consiste en estudiar las ventajas y aplicaciones de diferentes sistemas de control de velocidad y de recuperación en motores de inducción de rotor devanado. Para alcanzarlo se enumeran una serie de requisitos.

- ✓ Diseño de los circuitos a implementar.
- ✓ Empleo de las herramientas de cálculo electrotécnico, aprendidas durante la carrera.
- ✓ Aprender a utilizar software de modelizado y simulación de sistemas (MATLAB®/Simulink®).
- ✓ Aprender a interpretar los resultados obtenidos mediante el software y los cálculos.
- ✓ Desarrollar unos circuitos, que permiten regular la velocidad y recuperar energía

Aprender a gestionar de la mejor manera el tiempo de conceptualización, diseño y simulación del trabajo de final de grado.

2 Capítulo 2. Máquina Asíncrona.

2.1 Aspectos constructivos

Una máquina asíncrona es un dispositivo de conversión electromecánica, que bien puede transformar la energía eléctrica en mecánica y viceversa, dependiendo si trabaja como motor o generador. La máquina está compuesta por un estator y un rotor.

Dependiendo del tipo de rotor, la máquina asíncrona se clasifica como, **rotor en jaula de ardilla** o **rotor devanado (con anillos deslizantes)**.

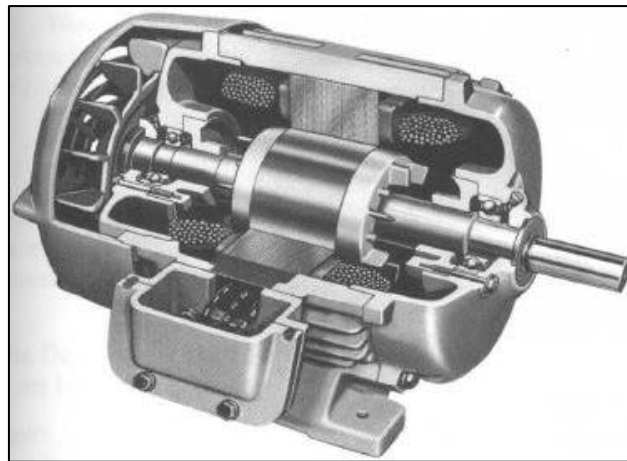


Figura 2.1 Motor asíncrono de jaula de ardilla.[3]

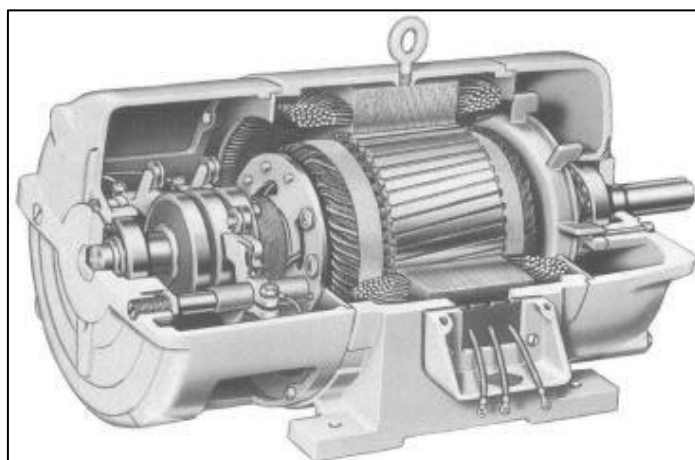


Figura 2.2 Motor asíncrono de rotor devanado, con anillos deslizantes. [3]

2.2 Aplicaciones de los motores de rotor devanado (anillos deslizantes) en la industrial actual

Las aplicaciones en que estos motores son altamente recomendados, pertenecen a los casos en que la carga posee un alto par resistente o alta inercia en la partida. Como por ejemplo molinos de bolas, trituradores, ventiladores, cintas transportadoras, bombas de agua y mezcladores en la industria petroquímica, elevadores, grúas de pórtico eleva contenedores, etc.



Figura 2.3 Molino de bolas empleado para la trituración de mineral [1]

Los motores de rotor devanado y anillos deslizantes son una herramienta increíble, alimentan máquinas gigantescas y resuelven problemas en la industria actual.



Figura 2.4 Hornos de cemento, cortesía de Xinhai mineral processing EPC [2]

Los motores de rotor devanado, con anillos deslizantes de hoy en día disponen de sistemas automatizados que levantan las escobillas de los anillos colectores, evitando de esta forma, el desgaste innecesario de las escobillas y anillos colectores durante el funcionamiento en régimen, permitiendo un mayor tiempo de uso para el conjunto.

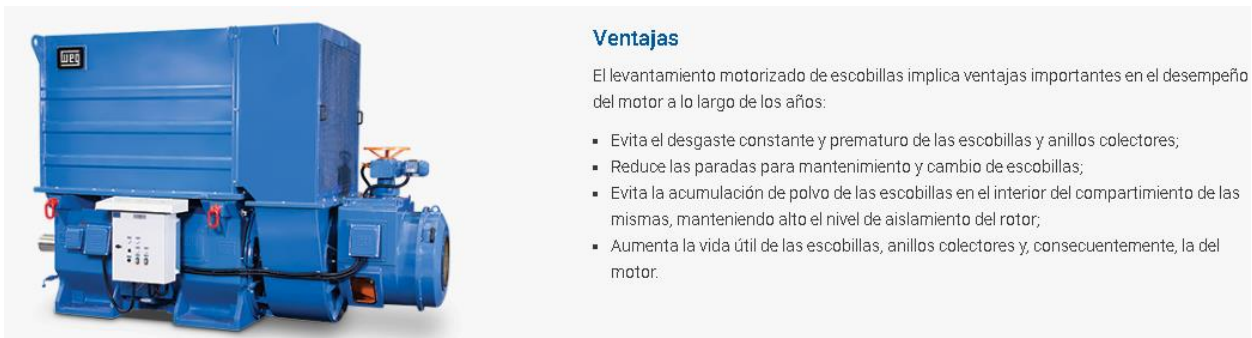


Figura 2.5 Motor de horno de cemento, con sistema motorizado de escobillas[3].

En la Figura 2.6 se explica con detalle cómo se realiza la desconexión de las escobillas y se cortocircuita el rotor una vez el motor alcanza su velocidad.

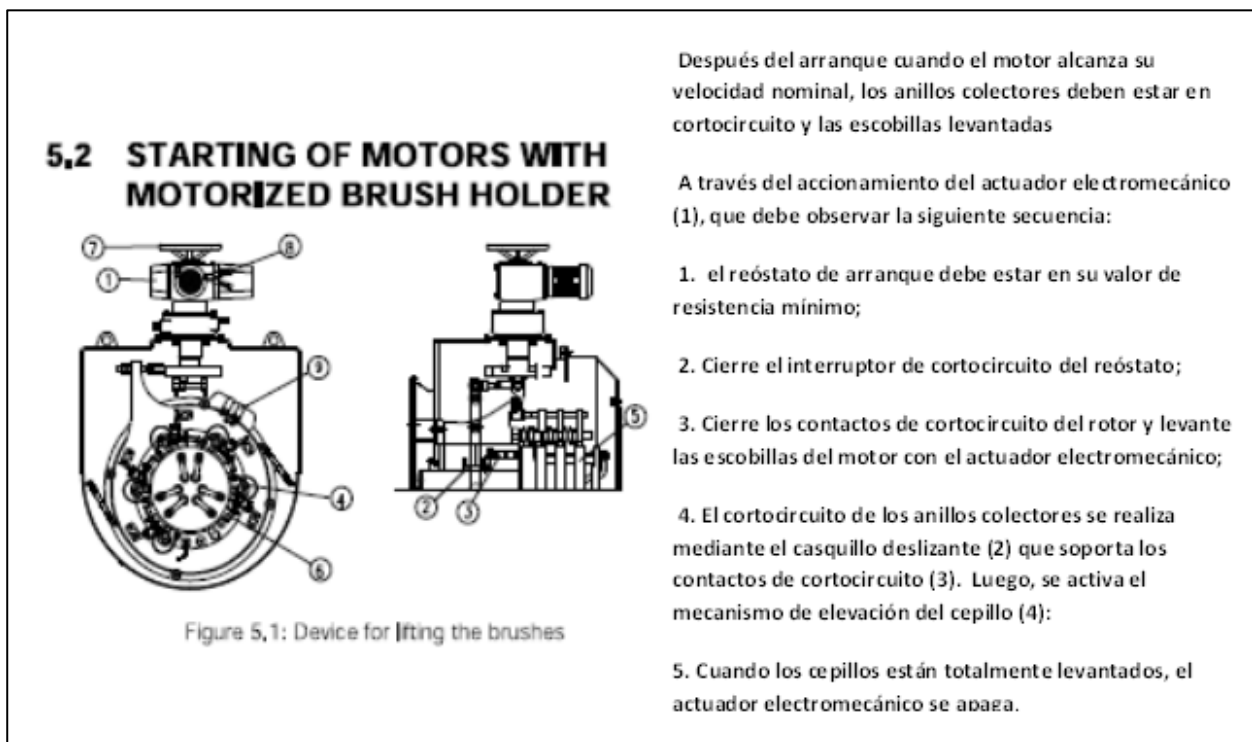


Figura 2.6. Sistema mecánico conexión y desconexión de escobillas [3].

Los generadores asíncronos, empleados hoy en día usan el mismo principio que los motores de rotor devanado con anillos deslizantes, la máquina absorbe potencia mecánica por el eje, que es suministrada por la hélice del aerogenerador y la convierte en energía eléctrica.

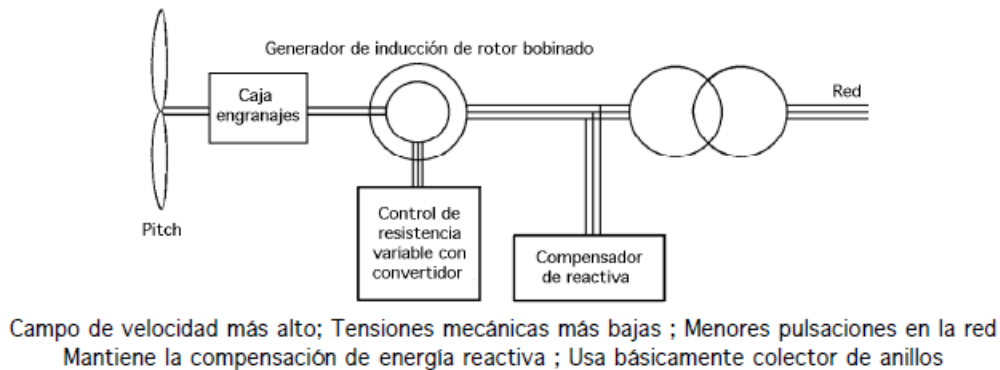


Figura 2.7 Principio de funcionamiento de un aerogenerador [4]

2.3 Funcionamiento

El funcionamiento del motor asíncrono, se basa en el principio de inducción de Faraday y la ley de Lenz. La Ley de Faraday, explica que la variación del flujo concatenado en un lazo (o espira), varía en función del tiempo, se induce una tensión entre sus terminales, el valor de la tensión inducida es proporcional al ritmo de variación del flujo[2].

$$e = -N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Ecuación 2.1

Siendo:

e = tensión inducida (V)

N = número de espiras en la bobina

$\Delta\phi$ = variación del flujo en el interior de la bobina (Wb)

Δt = intervalo de tiempo durante el que varía el flujo (s),

En el motor asíncrono al aplicar corriente alterna trifásica a las bobinas inductoras, se produce un campo magnético constante no variable, con la que se alimenta el motor.

Este campo al girar alrededor del rotor, en estado de reposo, inducirá una tensión en el mismo, que seguirá el movimiento del campo estatórico, produciendo un par motor que hace que el rotor gire.

De acuerdo con la ley de Faraday la fuerza electromotriz inducida **f.e.m.**, en un conductor de longitud **L** que se mueve con una velocidad **v** dentro de un campo magnético **B**, tiene un valor:

$$e = \int (v \times B) dL = (v \times B) \cdot L$$

Ecuación 2.2

Siendo:

e= tensión inducida (V)

v= velocidad relativa del conductor (m/s)

B = densidad del flujo magnético (T)

L = Longitud del conductor en el campo magnético (m).

Debido a la configuración del rotor, empezará a circular la corriente por los conductores del rotor, se genera una fuerza de magnitud, que se obtiene mediante la ley vectorial (ley de Biot-Savar).

$$F = I(L \times B)$$

Ecuación 2.3

Siendo:

I= intensidad de la corriente (A)

L = Longitud del conductor (m)

B= densidad del flujo magnético (T).

F= fuerza (N)

Significa que, la fuerza que actúa en el elemento de conductor es directamente proporcional a la intensidad de la corriente, la inducción magnética y a la longitud del conductor.

Con el producto de esta fuerza, multiplicado por el radio del motor e integrándolo, a todos los conductores del rotor, generará el par total de la máquina.

Habitualmente el estator de la máquina asíncrona, está compuesto por tres bobinas desfasadas 120° en el espacio y por **n** pares de polos **p**, cuando se inyecta una corriente por ellos en una red trifásica con frecuencia **f_s**, se genera una fuerza electromotriz giratoria, que a su vez genera un flujo giratorio en el entrehierro con una velocidad en revoluciones **ns**, por minuto (r.p.m.)[4].

$$n_s = \frac{120 \cdot f_s}{p} \quad (r.p.m)$$

Ecuación 2.4

Llamada velocidad de sincronismo, el rotor siguiendo el campo giratorio del estator empezará a girar, cuanto más se aproxime la velocidad del rotor n_r , a la del campo giratorio del estator n_s , menor será la fuerza electromotriz inducida y por lo tanto menor será el par interno, llegando a desaparecer cuando $n_r = n_s$.

El rotor debe girar a una velocidad inferior. Aparece entonces la variable deslizamiento s , que relaciona la velocidad del campo giratorio del estator con la velocidad del rotor.[4]

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

Ecuación 2.5

La velocidad de sincronismo, estará relacionada con la velocidad angular de sincronismo, por medio de la siguiente ecuación [4]:

$$\omega_s = \frac{2\pi}{60} \cdot n_s$$

Ecuación 2.6

Y a partir de sincronismo ($s = 0$), relacionaremos la velocidad angular del rotor ω_r , con la velocidad de sincronismo ω_s [4].

$$\omega_r = (1 - s) \cdot \omega_s$$

Ecuación 2.7

También pudiéndose expresar en revoluciones por minuto ($r.p.m$) donde n_r es la velocidad del rotor y n_s , es la velocidad de sincronismo del estator [4].

$$n_r = (1 - s) \cdot n_s$$

Ecuación 2.8

Las frecuencias del estator f_s y el rotor f_r , estarán relacionadas por [1]:

$$f_r = s \cdot f_s$$

Ecuación 2.9

Se denomina E_1 , el valor eficaz de la $f.e.m$, inducida por fase en el estator y E_2 el valor eficaz de la $f.e.m$ inducida al rotor, se tendrá [1]:

$$E'_2 = s \cdot E_2$$

Ecuación 2.10

$$E'_2 = E_1$$

Ecuación 2.11

Donde E'_2 es la tensión reducida del rotor al estator.

2.4 Circuito equivalente de motor asíncrono, por fase

Para poder realizar los cálculos, se ha idealizado el circuito del motor a un modelo equivalente con el objetivo de agilizarlos, esta aproximación es válida para motores de potencia superior a 10 kW [1].

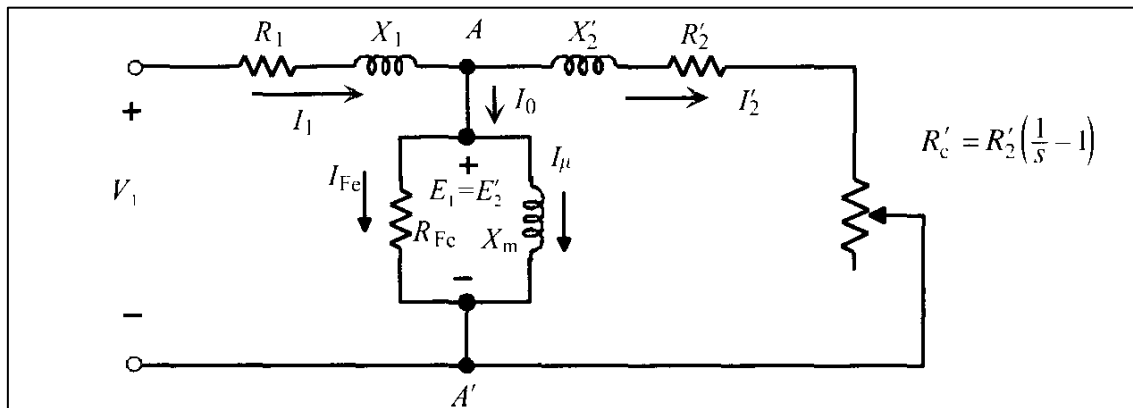


Figura 2.8 Circuito equivalente del motor asíncrono [1].

Las variables y ecuaciones empleadas por el modelo serán[4]:

- ✓ R_1 representa la resistencia del estator (Ω).
- ✓ X_1 representa la reactancia del estator (Ω).
- ✓ R'_2 representa la resistencia del rotor reducida al estator (Ω).
- ✓ R'_c representa el efecto de carga (Ω).
- ✓ X'_2 representa la reactancia del rotor reducida al estator (Ω).
- ✓ R_{Fe} representa el efecto de disipación en el hierro (Ω).
- ✓ X_m representa la reactancia del efecto de magnetización del hierro (Ω).
- ✓ R'_2/s representa el efecto de la velocidad sobre la resistencia reducida del rotor (Ω).

2.5 Balance de potencia

En el motor asíncrono, se convierte la energía eléctrica en mecánica, esta es transmitida del estator al rotor, en este proceso, se producen pérdidas.

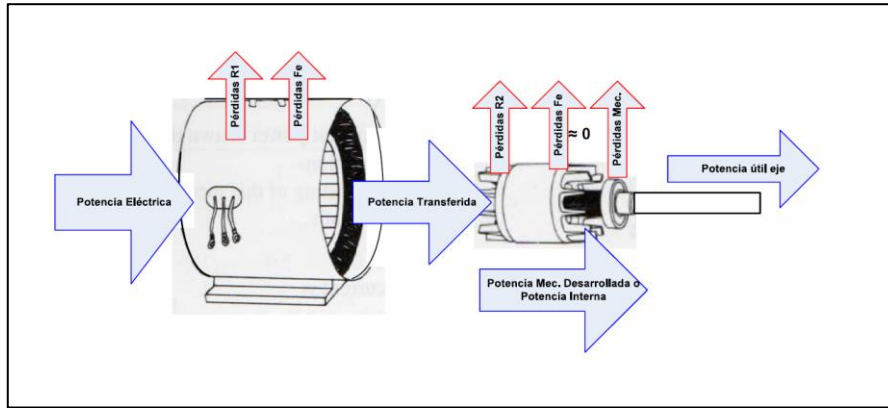


Ilustración 2.1. Flujo de potencia del motor asíncrono [4]

Se define como potencia entrada P_e , a la energía activa que pasa de la red al estator trifásico[4].

$$P_e = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Ecuación 2.12

Las pérdidas en el estator, serán la suma de las pérdidas producidas en cobre en forma de calor P_{cu1} , junto con las pérdidas producidas en hierro P_{fe} , también en forma de calor. Así la potencia transferida al estator P_t será [1]:

$$P_t = P_e - P_{cu1} - P_{fe} = P_e - 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 - P_{fe}$$

Ecuación 2.13

También se establecerá una relación entre la potencia transferida P_t , el par de torsión T y la velocidad angular de sincronismo ω_s [4].

$$P_t = \omega_s \cdot T$$

Ecuación 2.14

Las pérdidas producidas en el rotor, en forma de calor P_{cu2} , se definirán como[4]:

$$P_{cu2} = 3 \cdot R'_2 \cdot I'^2_2$$

Ecuación 2.15

Así, la potencia mecánica transferida, al eje del rotor o potencia mecánica interna ***P_{mi}***, se tendrá[4]:

$$P_{mi} = P_t - P_{cu2} = P_t - 3 \cdot R'_2 \cdot I_2'^2$$

Ecuación 2.16

Las pérdidas en el hierro del rotor se consideran despreciables, debido a la baja frecuencia en el mismo[4].

$$P_{mi} = 3 \cdot R'_2 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{1-s}{s}$$

Ecuación 2.17

Las pérdidas mecánicas ***Pérd Mec***, serán la suma de las pérdidas producidas por remoción del aire (ventilación) y fricción de cojinetes.

La potencia de salida del motor, será la potencia útil ***P_u*** y quedará definido como[4]:

$$P_u = P_{mi} - P_{érd Mec}$$

Ecuación 2.18

Y también estará relacionada con par útil ***T_u*** y la velocidad angular del rotor ***ω_r***, a través de la siguiente ecuación[4].

$$P_u = T_u \cdot \omega_r$$

Ecuación 2.19

El rendimiento del motor ***η***, será la relación entre las potencias de entrada y la útil de salida[4]:

$$\eta = \frac{P_u}{P_e}$$

Ecuación 2.20

Finalmente se puede establecer la siguiente relación[1]:

$$P_e = P_{cu1} + P_{fe} + P_{cu2} + P_u + P_{érd Mec}$$

Ecuación 2.21

También se podrán establecer las siguientes relaciones, que serán de utilidad [1]:

$$\frac{P_{cu2}}{P_{mi}} = \frac{3R'_2 I_2'^2}{3R'_2 I_2'^2 (1-s)/s} = \frac{s}{1-s}$$

Ecuación 2.22

Por otra parte la potencia transferida o que atraviesa el entrehierro P_t se puede poner [1].

$$P_T = P_{mi} + P_{cu2} = 3 \frac{R'_2}{s} I_2'^2 = \frac{P_{cu2}}{s} = \frac{P_{mi}}{1-s}$$

Ecuación 2.23

2.6 Par de Torsión

El par de rotación dependerá en gran medida del cuadrado de la tensión, a partir del circuito equivalente del motor asíncrono y empleando el circuito equivalente de Thévenin, del estator visto desde el rotor, se establecen las siguientes relaciones:

El par desarrollado por el motor N_m , se definirá como[4]:

$$T = \frac{1}{\omega s} \cdot \frac{(3 \cdot V_{th}^2) \cdot (R'_2/s)}{(R_{th} + R'_2/s)^2 + (X_{th} + X'_2)^2}$$

Ecuación 2.24

A partir de la gráfica podemos establecer la relación entre la velocidad y el par de torsión.

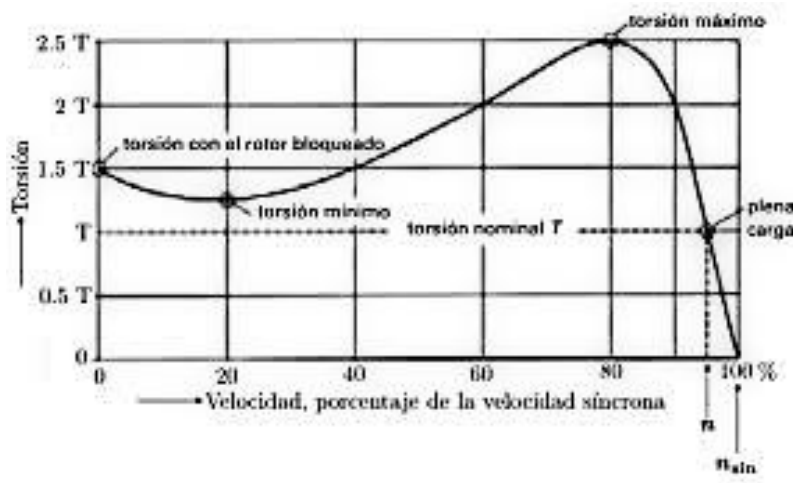


Figura 2.9 Par torsión vs Velocidad [1]

En el momento de máxima transferencia de potencia de estator al rotor, se definirá par máximo Nm, como:

$$T_{max} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{0,5 \cdot 3 \cdot V_{th}^2}{(R_{th} + (R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2)^{1/2}}$$

Ecuación 2.25

Para este par máximo se definirá un deslizamiento máximo como[1]:

$$s_{max} = \frac{R'_2}{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2}$$

Ecuación 2.26

3 Capítulo 3. Puente rectificador trifásico de 6 diodos, no controlado.

Un puente rectificador trifásico de 6 diodos, es un dispositivo electrónico capaz de convertir una corriente alterna de entrada, en una corriente continua de salida, mediante dispositivos semiconductores, capaces de manejar grandes potencias.

En el caso del puente rectificador trifásico de 6 diodos, no controlado, éste emplea como semiconductor el diodo. Se denomina de este modo, porque las corrientes que circulan por los 6 diodos que lo conforman, se inician todas en distintos momentos y porque no se puede controlar la potencia de salida, es decir, para una tensión fija de entrada, la salida de tensión también es fija.

3.1 Funcionamiento del puente rectificador trifásico de 6 diodos, no controlado.

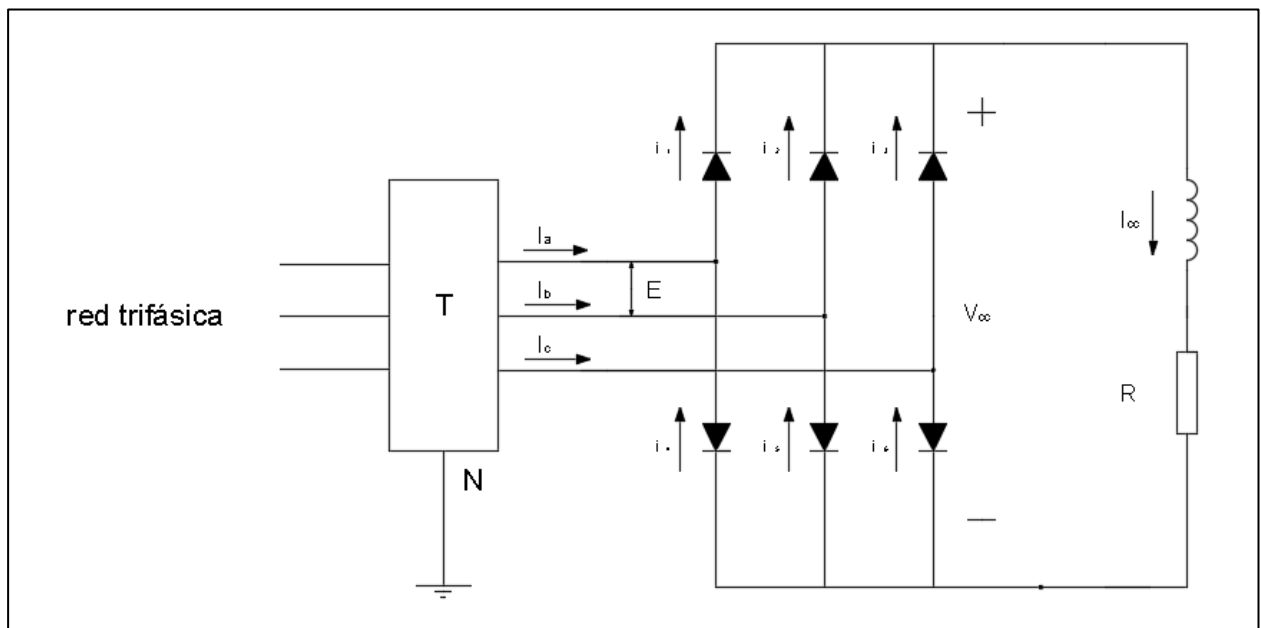


Ilustración 3.1 Rectificador trifásico de 6 diodos con filtro inductivo.

Cada diodo conduce durante 120° o $\frac{\pi}{3}$ *radianes*, las corrientes suministradas por el transformador, se obtienen a partir de las leyes de Kirchhoff [2].

$$I_a = i_1 - i_4 \quad I_b = i_2 - i_5 \quad I_c = i_3 - i_6$$

Ecuación 3.1

Serán pulsaciones alternas iguales desfasadas 120° entre sí (Figura 3.1). Circularán por el devanado del secundario del transformador durante 2/3 del tiempo dando como resultado que el factor de utilización de un transformador de 100 kVA, puede suministrar 95 kW en corriente directa sin sobrecalentarse.

El voltaje promedio de salida del rectificador V_{cc} será[2]:

$$V_{cc} = 1,35 E$$

Ecuación 3.2

Siendo:

V_{cc} = tensión media en continua.

E = Tensión eficaz de la red

$1,35$ = constante de valor exacto $3\sqrt{2}/\pi$

La intensidad promedio de salida del rectificador I_{cc} será[5]:

$$I_{cc} = 1,225 I$$

Ecuación 3.3

Siendo:

I_{cc} = intensidad media en continua

I = Intensidad eficaz de línea de la red

$1,225$ = constante de valor exacto $\sqrt{3/2}$

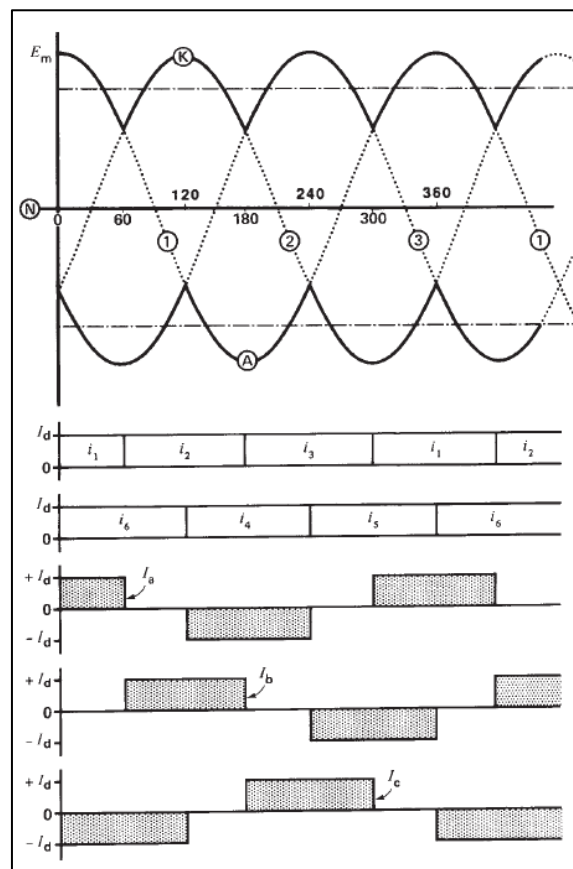


Figura 3.1 Ondas de tensión y corriente.[2]

La conmutación de cada diodo para distintos valores de tensión en la red trifásica será:

Tabla 3.1 Conmutación de los diodos [5]

Intervalo en grados	D1	D2	D3	D4	D5	D6
$0 < \omega t < 30$	On	Off	Off	Off	Off	On
$30 < \omega t < 60$	On	On	Off	Off	Off	Off
$60 < \omega t < 90$	Off	On	On	Off	Off	Off
$90 < \omega t < 120$	Off	Off	On	On	Off	Off
$120 < \omega t < 150$	Off	Off	Off	On	On	Off
$150 < \omega t < 180$	Off	Off	Off	Off	On	On
$180 < \omega t < 210$	On	Off	Off	Off	Off	On
$210 < \omega t < 240$	On	On	Off	Off	Off	Off
$240 < \omega t < 270$	Off	On	On	Off	Off	Off
$270 < \omega t < 300$	Off	Off	On	On	Off	Off
$300 < \omega t < 330$	Off	Off	Off	On	On	Off
$330 < \omega t < 360$	Off	Off	Off	Off	On	On

4 Capítulo 4. Desarrollo de modelos de estudio mediante Simulink (Matlab).

Para poder realizar las pruebas de circuito, se empleará el simulador eléctrico, Simulink de Matlab y su herramienta Sympower. Este sistema permite hacer todo tipo de análisis de los circuitos, tantas veces como sea necesario sin implicar ningún tipo de riesgo eléctrico para las personas. Este software ofrece la posibilidad de realizar el modelado de cualquier circuito, pues sus bibliotecas contemplan múltiples elementos y componentes, para poder hacerlo. En cada uno de los elementos se pueden modificar sus parámetros para adaptarlos, a las necesidades del usuario.

En este proyecto se realizarán en paralelo los cálculos matemáticos y el uso del modelo, para poder comprobar los resultados con el simulador y obtener conclusiones

Para visualizar los resultados el simulador dispone de unos elementos llamados “Scope”, donde se grafican las señales obtenidas, también dispone de visores que permiten obtener y visualizar, el valor numérico.

En todo el desarrollo de las diferentes aplicaciones, se empleará siempre, el mismo modelo de motor estándar obtenido de Matlab, las especificaciones técnicas, son las que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.1 Parámetros del modelo de motor Simulink

Parámetros motor de rotor devanado					
Potencia Nominal (KVA)	18,45	Frecuencia (Hz)	50	Tensión compuesta (V)	400
Resistencia del estator R1 (Ω)	0,5968	Inductancia estator X1 (H)	0.0003495	Inductancia magnetización Xm (H)	0.0354
Resistencia del rotor R'2 (Ω)	0.6258	Inductancia del rotor X'2 (H)	0.005473	Número de polos	4
Coeficiente de inercia ($\text{Kg}\cdot\text{m}^2$)	0.05	Coeficiente de fricción ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$)	0.005879	Cos ϕ	0,75
Velocidad nr (r.p.m)	1432,28	Velocidad angular ω_r rad/s	149,99		

También en todas las pruebas, a no ser que se especifique, se empleará un par resistente, al cual llamaremos contrapar de valor 100 Nm.

4.1 Motor con rotor devanado en cortocircuito.

El modelo empleado es el que se muestra en la figura, donde se puede apreciar que, el rotor situado en la parte derecha de imagen se encuentra cortocircuitado.

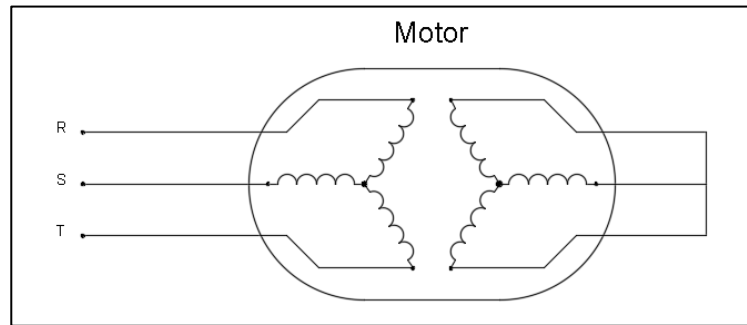


Figura 4.1. Motor con rotor devanado en cortocircuito

A partir de los valores del motor genérico del simulador de la Tabla 4.1 y empleando el circuito equivalente del motor asíncrono Figura 2.8, suponiendo que el rotor del mismo, estuviese cortocircuitado en el arranque, se han calculado los diferentes parámetros del motor.

4.1.1 Cálculo de la velocidad del motor

Para calcular la velocidad síncrona de los campos magnéticos del estator, se ha empleado la Ecuación 2.4:

$$n_s = \frac{120 \cdot f_s}{p} = \frac{120 \cdot 50}{4} = 1500 \text{ r. p. m.}$$

Ecuación 4.1

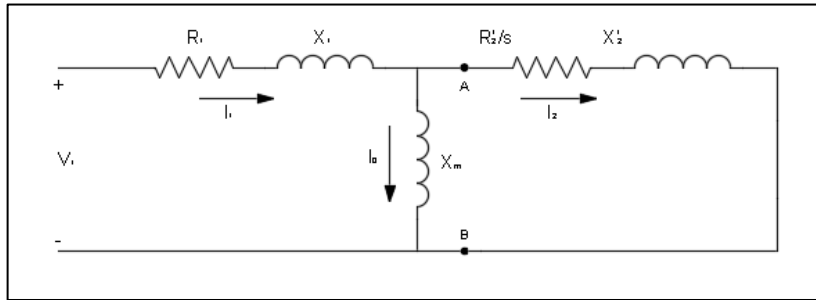
Que expresada en radianes por segundo mediante la Ecuación 2.6, resulta:

$$\omega_s = \frac{1500 \cdot 2\pi}{60} = 157,08 \text{ rad/s}$$

Ecuación 4.2

4.1.2 Cálculo de la intensidad de arranque

A partir del modelo de la Figura 2.8 y junto con los parámetros del motor Tabla 4.1 se ha realizado el modelado del circuito equivalente del simulador, siendo este:



$R_1 =$	$0,5968 \Omega$
$X_1 =$	$0,1098j \Omega$
$R'_2 =$	$0,6258 \Omega$
$X'_2 =$	$1,7194j \Omega$
$X_m =$	$11,121j \Omega$
$V_1 =$	$230,94 V$

Figura 4.2. Circuito equivalente al modelo del simulador.

En el modelo que ofrece el simulador se puede apreciar, que no se tienen en cuenta las pérdidas en el hierro *Pfe*.

Se han empleado las ecuaciones de Kirchhoff, para poder obtener la intensidad de arranque de una manera analítica y poder compararla con los resultados obtenidos por el simulador, así pues las ecuaciones del circuito serán:

$$V_1 = (R_1 + jX_1) \cdot I_1 + jX_m \cdot (I_1 - I'_2)$$

Ecuación 4.3

$$0 = jX_m \cdot (I'_2 - I_1) + \left((R'_2/s) + jX'_2 \right) \cdot I'_2$$

Ecuación 4.4

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1 + X_1 - \frac{jX_m^2}{jX_m + \frac{R'_2}{s} + jX'_2}}$$

Ecuación 4.5

$$I'_2 = I_1 \cdot \frac{jX_m}{jX_m + \frac{R'_2}{s} + jX'_2}$$

Ecuación 4.6

Se ha realizado la implementación del motor, mediante el modelo simulado.

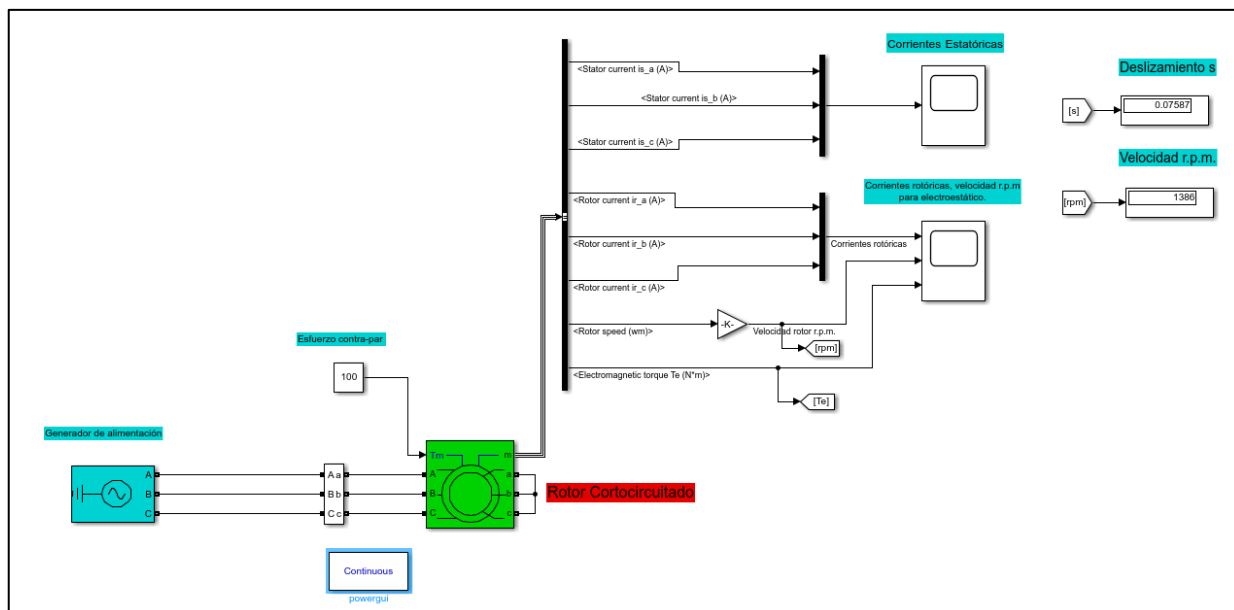


Figura 4.3 Esquema del modelo simulado, de motor con rotor devanado en cortocircuito.

Una vez hecha la implementación, se ha podido obtener la intensidad en el momento del arranque, donde el deslizamiento es igual a 1.

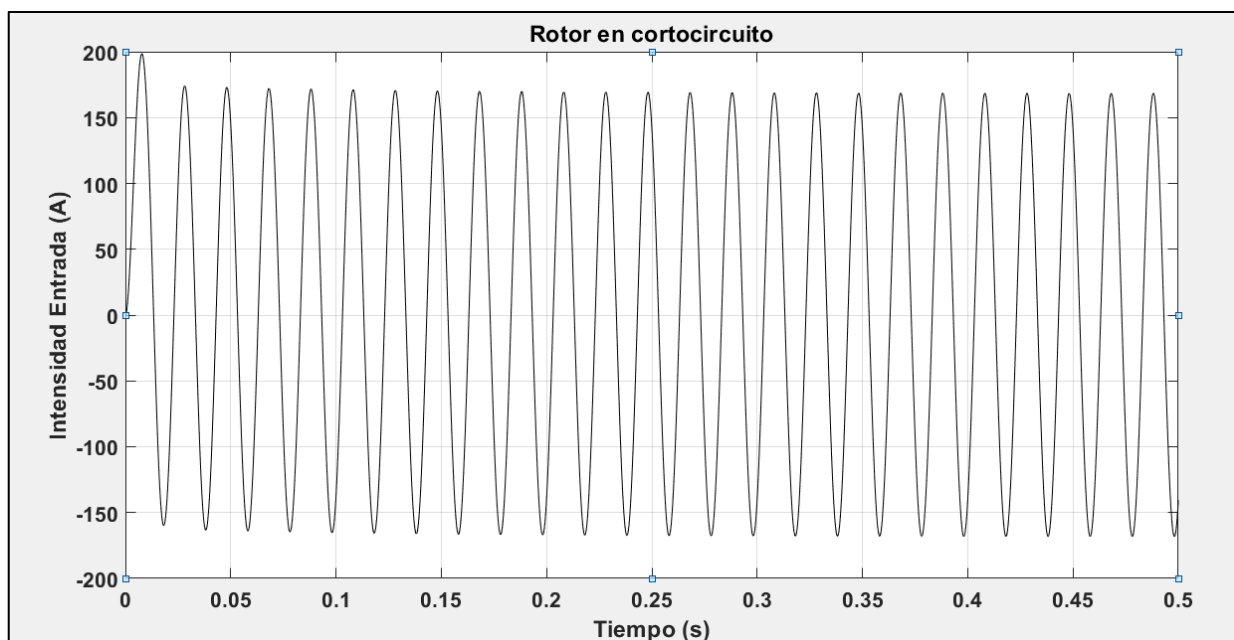


Figura 4.4 Gráfica de Intensidad de arranque con rotor devanado en cortocircuito.

A partir de la Ecuación 4.5 se ha obtenido mediante cálculo la intensidad de arranque y se puede comparar con la del modelo simulado, mediante la gráfica de la Figura 4.4

I de arranque (Modelo simulado) = 118,50 A

I de arranque (Calculada) = 119,36 A

En la gráfica de la Figura 4.5, se puede ver la evolución de la intensidad en función de la velocidad, como se puede apreciar al aumentar la velocidad, disminuye el valor de deslizamiento, efecto que produce un aumento en la resistencia eléctrica del rotor y por consiguiente, una disminución en la intensidad y de par.

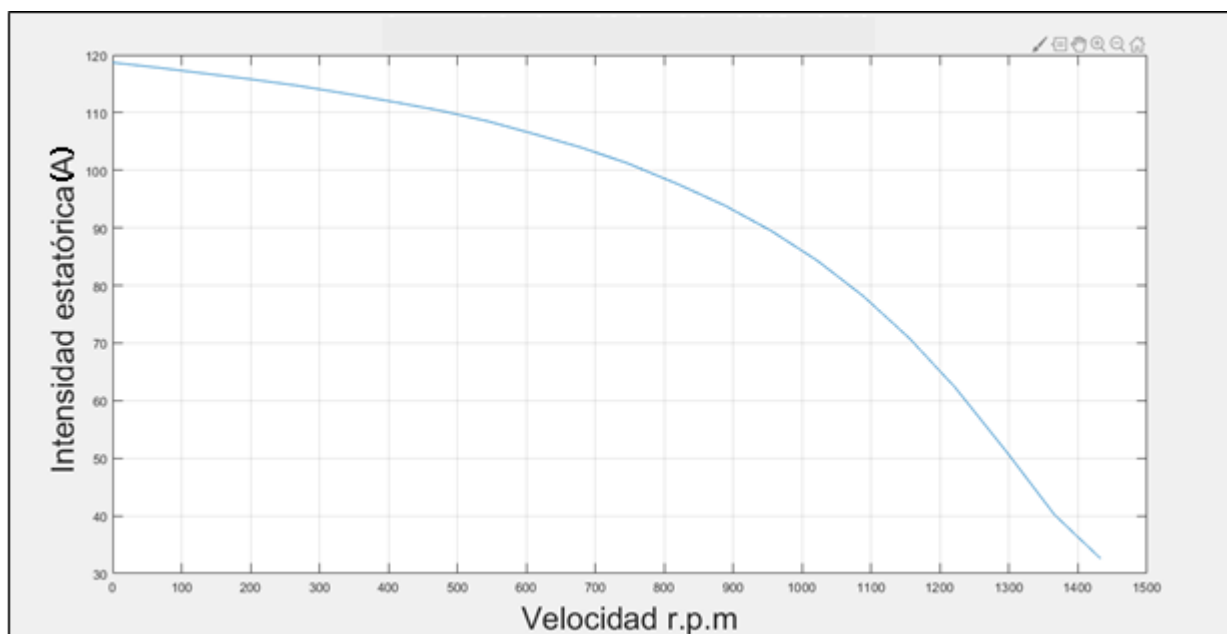


Figura 4.5 Intensidad vs Velocidad

4.1.3 Par de torsión de la máquina

Conocer el par de torsión de estas máquinas es esencial para entender las limitaciones, se necesita saber cuál el máximo contrapar que puede vencer al arrancar o que par máximo puede alcanzar el motor una vez esté en marcha. Se ha comentado, que en muchas ocasiones el uso habitual de estos motores, es el movimiento de cargas muy pesadas

Para obtener el par de torsión de la máquina se ha calculado el circuito equivalente de Thévenin, partiendo del modelo equivalente de la Figura 4.2, se ha realizado la siguiente simplificación (Figura 4.6).

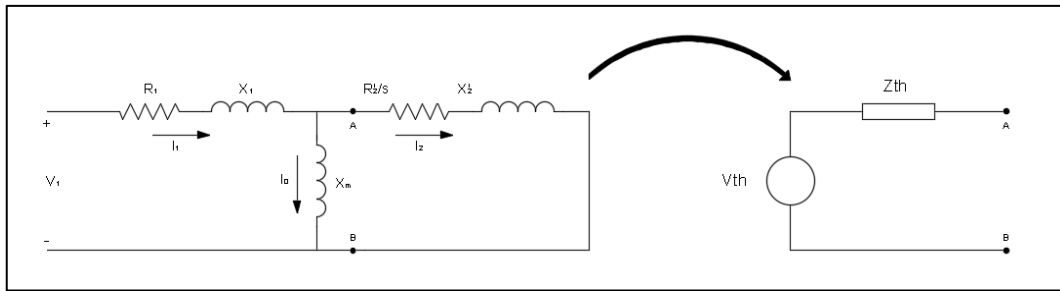


Figura 4.6. Transformación del modelo equivalente a circuito equivalente de Thévenin.

Siendo la tensión e impedancia equivalente de Thévenin entre los nodos A y B, igual a:

$$V_{th} = \frac{jX_m}{(R_1 + jX_1) + jX_m} = 228,42 / 2,99^\circ \text{ V}$$

Ecuación 4.7

$$Z_{th} = \frac{jX_m * (R_1 + X_1)}{jX_m + (R_1 + X_1)} = 0,5734\Omega + 0,13862j\Omega$$

Ecuación 4.8

A partir de la Ecuación 2.24, se podrá calcular el par de torsión de la máquina, en este caso se han calculado los diferentes parámetros para un par de 100 Nm:

$$T = \frac{1}{\omega s} \cdot \frac{(3 \cdot V_{th}^2) \cdot (R'_2/s)}{(R_{th} + R'_2/s)^2 + (X_{th} + X'_2)^2}$$

$$100 = \frac{1}{157,08} \cdot \frac{(3 \cdot 228,42^2) \cdot \left(\frac{0,6258}{s}\right)}{\left(0,5734 + \frac{0,6258}{s}\right)^2 + (0,13862 + 1,71)^2}$$

Ecuación 4.9

El resultado obtenido es una ecuación de segundo grado donde.

$$s_1 = 0,07476 \text{ y } s_2 = 1,5702$$

Sólo **0,07476** ($0 < s \leq 1$) corresponde al funcionamiento como motor.

El resultado de s_1 y s_2 , aplicando la Ecuación 2.8 corresponde:

$$nr = (1 - s) \cdot ns = (1 - 0,07476) \cdot 1500 = 1387,86 \text{ r.p.m}$$

Ecuación 4.10

Los resultados obtenidos de deslizamiento y velocidad del rotor, con el modelo simulado, han sido los siguientes:

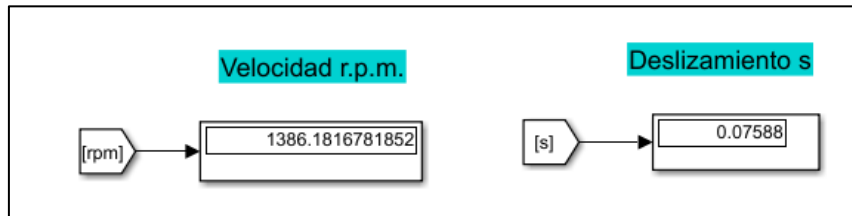


Figura 4.7 Velocidad y deslizamiento del motor con contrapar 100 Nm.

Para calcular el par de arranque de la máquina, nuevamente se aplica la Ecuación 2.25 y teniendo en cuenta que el deslizamiento en el arranque es igual a 1.

$$T = \frac{1}{ws} \cdot \frac{(3 \cdot V_{th}^2) \cdot (R'_2/s)}{(R_{th} + R'_2/s)^2 + (X_{th} + X'_2)^2}$$

$$T = \frac{1}{157,08} \cdot \frac{(3 \cdot 228,42^2) \cdot \left(\frac{0,6258}{1}\right)}{\left(0,5734 + \frac{0,6258}{1}\right)^2 + (0,13862 + 1,71)^2} = 127,61 \text{ Nm}$$

Ecuación 4.11

En las pruebas realizadas mediante el simulador del circuito, se ha podido comprobar que, existe un máximo par resistente en el arranque situado en este caso en 128 Nm.(Figura 4.8) Al situar el deslizamiento en condiciones de arranque, el motor no ejerce el suficiente par para vencer un par resistente superior (Figura 4.8).

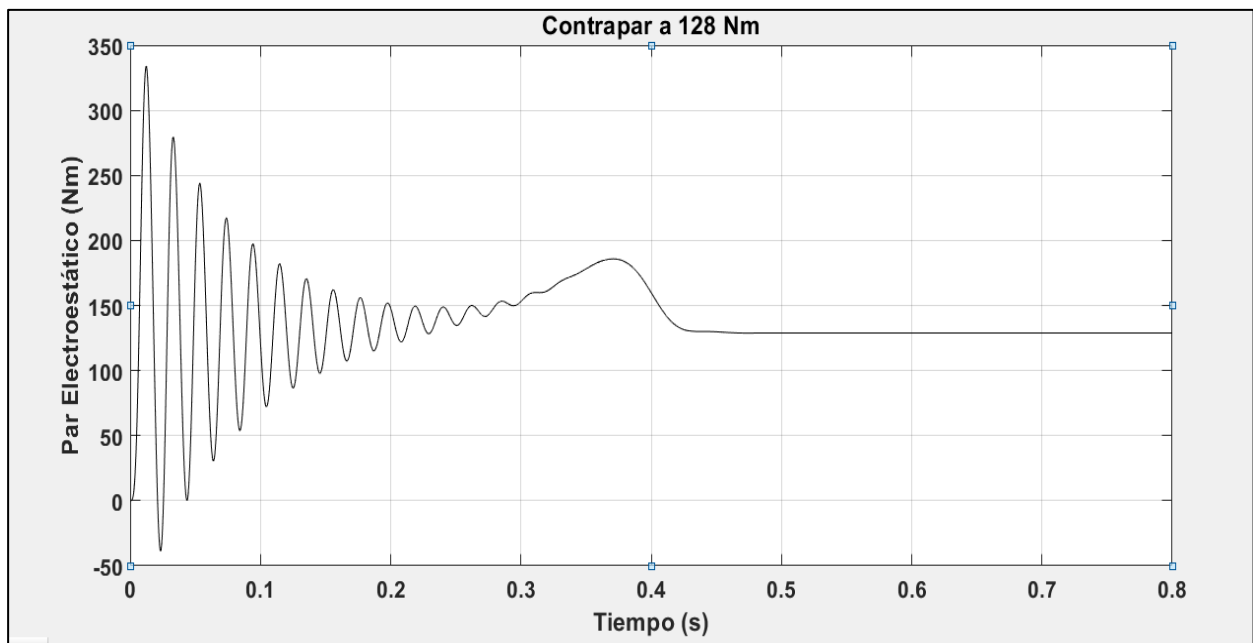


Figura 4.8 Par ejercido por el motor con contrapar 128 Nm

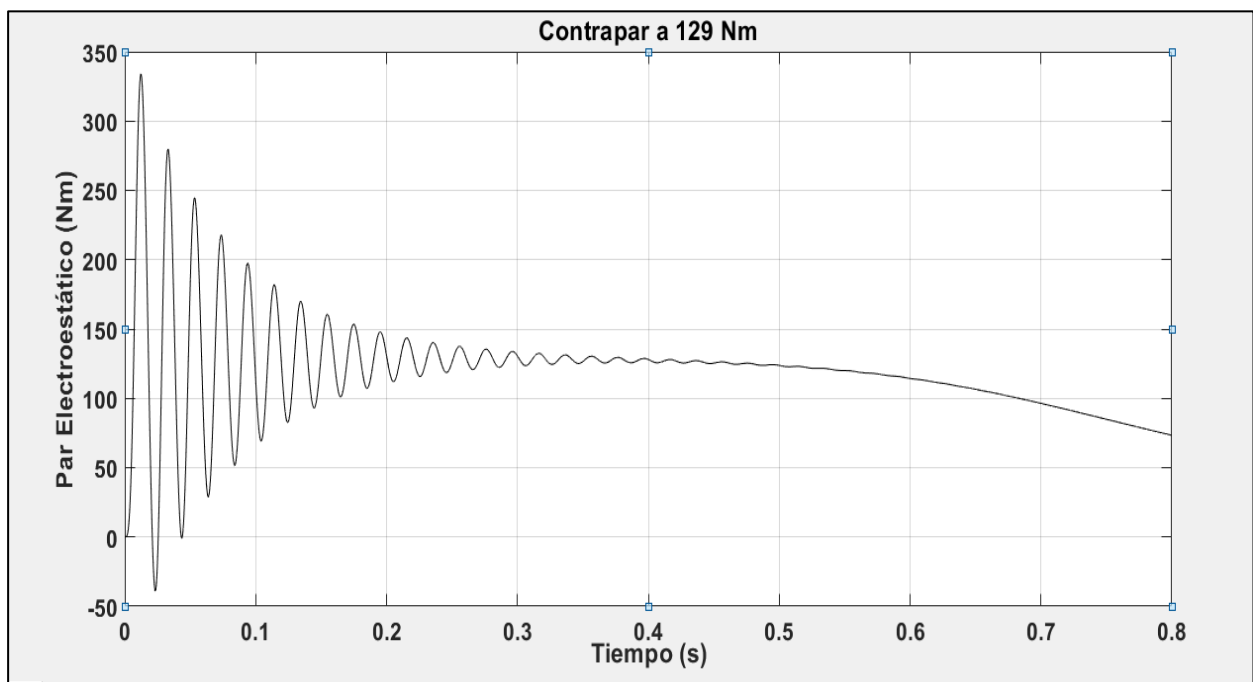


Figura 4.9 Par ejercido por el motor con contrapar 129 Nm.

El efecto que se produce en la máquina, es exceso de intensidad, al tener que vencer este par. Con lo cual los efectos físicos serán un calentamiento excesivo en los devanados, por el efecto Joule, dicho calentamiento puede llegar a derretir el barniz aislante que protege a los devanados y cortocircuitar la máquina.

Para conocer las posibilidades de par máximo que puede ofrecer este motor, se aplicará la Ecuación 2.25.

$$T_{max} = \frac{1}{ws} \cdot \frac{0,5 \cdot 3 \cdot V_{th}^2}{(R_{th} + (R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2)^{\frac{1}{2}})} = 197,37 \text{ Nm}$$

Ecuación 4.12

Como puede observarse, el par máximo es proporcional al cuadrado del voltaje suministrado y también inversamente proporcional a las impedancias del estator y de la reactancia del rotor, cuanto más pequeñas sean las reactancias de la máquina, mayor será el par máximo, que es capaz de alcanzar [3]. A partir la Ecuación 2.26, se obtiene el punto de deslizamiento, donde el par es máximo.

$$s_{max} = \frac{R'_2}{(R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2)^{\frac{1}{2}}} = 0,3224$$

Ecuación 4.13

En la Figura 4.10, se ha obtenido la curva de par-deslizamiento situando el par resistente a 0 Nm, para poder obtener, la potencia que el motor, puede ofrecer.

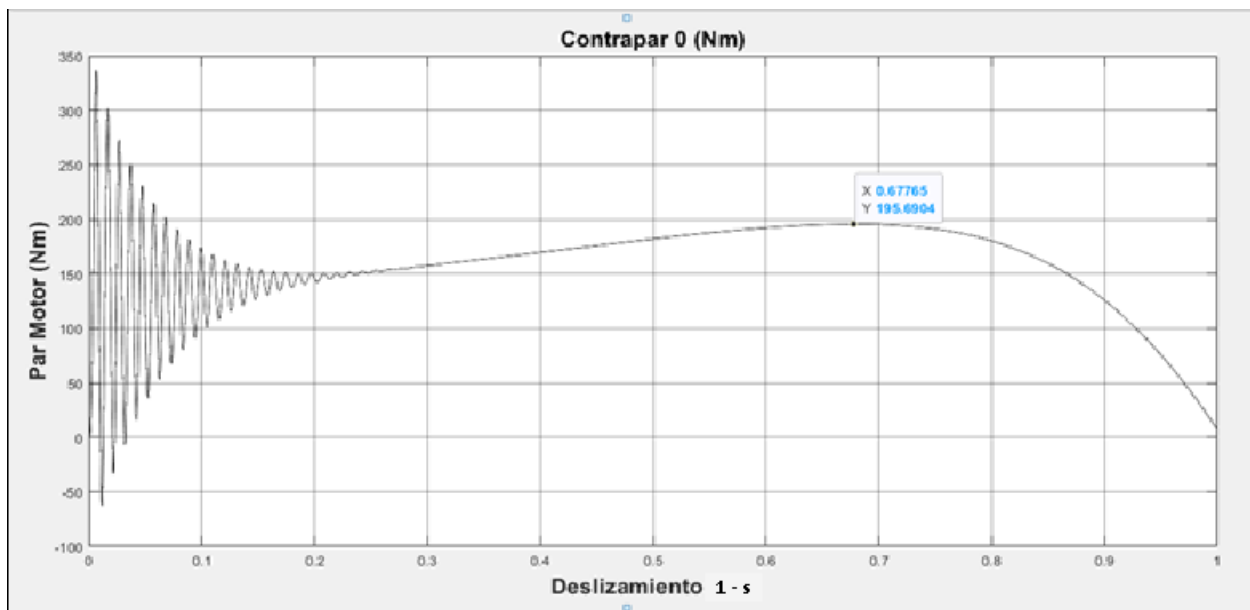


Figura 4.10 Par desarrollado vs Velocidad, contrapar 0 Nm.

Como puede observarse en la gráfica existe un punto máximo de par correspondiente a **195,69 Nm** y correspondiente al punto **(1 - s) = 0,6776**, y se corresponde al siguiente valor de deslizamiento y velocidad de rotor (Ecuación 2.8):

$$s = 1 - 0,6776 = 0,3224$$
$$nr = (1 - s) * ns = 1016,4 \text{ r.p.m}$$

Ecuación 4.14

4.1.4 Balance de potencias del motor

En este apartado, se obtienen las potencias consumidas por los elementos que constituyen el motor, mediante la ayuda del simulador y cálculos.

La Ecuación 2.21, nos ofrece la siguiente expresión:

$$P_e = P_{cu1} + P_{fe} + P_{cu2} + P_u + P_{érd Mec}$$

En ella figuran las pérdidas del motor.

A partir de los resultados, de la Ecuación 2.24, se ha obtenido los valores de velocidad del rotor y deslizamiento, para la condición de carga de **100 Nm**.

$$s_1 = 0,07476 \text{ y } nr = 1387,86 \text{ r.p.m}$$

Mediante la Ecuación 4.5 y la Ecuación 4.6, se han calculado las intensidades del estator y rotor a partir de las leyes de Kirchhoff.

$$I_1 = 34,41 \text{ A}$$

$$I'_2 = 24,98 \text{ A}$$

A partir de la Ecuación 2.17 se calcula la potencia mecánica interna.

$$P_{mi} = \frac{3I'^2_2 R'_2 (1-s)}{s} = \frac{3 \cdot 24,98^2 \cdot 0,6258 \cdot (1 - 0,07476)}{0,07588} = 14493,33 \text{ W}$$

Ecuación 4.15

Para calcular las pérdidas mecánicas del motor se ha fijado la velocidad del rotor **$nr = 1499 \text{ r.p.m}$** , lo más cercana a la de sincronismo **$ns = 1500 \text{ r.p.m}$** . En estas condiciones la potencia útil será nula **$P_u = 0$** y las únicas pérdidas serán las producidas por remoción del aire (ventilación) y fricción de cojinetes, con esta velocidad el deslizamiento es de **$s = 0,00066$** .

Mediante la Ecuación 4.5 y la Ecuación 4.6, se ha calculado la intensidad para la condición de vacío:

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1 + jX_1 - \frac{jX_m^2}{jX_m + \frac{R'_2}{s} + jX'_2}}$$

$$I_1 = \frac{400/\sqrt{3}}{0,5968 + 0,1098j + 11,121j - \frac{(11,121j)^2}{11,121j + \frac{0,6258}{0,00066} + 1,71j}} = 20,52 \angle -86,37^\circ \text{ A}$$

Ecuación 4.16

$$I'_2 = I_1 \cdot \frac{jX_m}{jX_m + \frac{R'_2}{s} + jX'_2}$$

$$I'_2 = (1,2981 - 20,482j) \cdot \frac{11,121j}{11,121j + \frac{0,6258}{0,00066} + 1,71j} = 0,21 \angle -2,94^\circ \text{ A}$$

Ecuación 4.17

A partir de la Ecuación 2.12, se calcula la potencia eléctrica consumida por el motor, para condición de vacío.

$$P_e = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 20,52 \cdot \cos -86,37 = 898,977 \text{ W}$$

Ecuación 4.18

Se han calculado las pérdidas de Joule del estator y rotor, mediante la Ecuación 2.13 y la Ecuación 2.15.

$$P_{cu1} = 3R_1 I_1^2 = 3 \cdot 0,5968 \cdot 20,52^2 = 753,88 \text{ W}$$

Ecuación 4.19

$$P_{cu2} = 3R'_2 I'^2_2 = 3 \cdot 0,6258 \cdot 0,21^2 = 0,0843 \text{ W}$$

Ecuación 4.20

Y mediante la Ecuación 2.21, teniendo en cuenta que la potencia útil será nula se han obtenido las pérdidas mecánicas más las del hierro.

$$P_e = P_{cu1} + P_{fe} + P_{cu2} + P_u + P_{\text{érd Mec}}$$

$$P_{\text{érd Mec}} + P_{fe} = P_e - P_{cu1} - P_{cu2} = 899,977 - 753,88 - 0,0843 = 145 \text{ W}$$

Ecuación 4.21

Ya que entre los datos de la máquina (Tabla 4.1) no disponemos del dato de la resistencia del hierro (R_m), asumimos que $P_{fe} = 0$, con lo cual resulta:

$$P_{\text{érd Mec}} = 145 \text{ W}$$

Si calculamos este valor a partir de la Ecuación 2.17, para la condición de vacío, con $I'_2 = 0,21 \text{ A}$ y $s = 0,00066$, obtenemos:

$$P_{\text{érd Mec}} = 125 \text{ W}$$

El cual es muy parecido al anterior y seguramente más próximo a la realidad ya que la magnetización del hierro siempre produce calentamiento y pérdidas en éste. Pero para efectos de cálculo, en adelante utilizaremos 145 W ($P_{fe} = 0$), tal y como lo considera el modelo en Simulink.

La potencia útil P_u , en condición de carga, contrapar 100 Nm . Se ha calculado mediante la Ecuación 2.18.

$$P_u = P_{mi} - P_{\text{érd Mec}} = 14493,33 - 145 = 14348,33 \text{ W}$$

Ecuación 4.22

Para calcular las pérdidas de Joule del estator y rotor en condición de carga de 100 Nm de contrapar, se ha empleado la Ecuación 2.13 y la Ecuación 2.15.

$$P_{cu1} = 3R_1 I_1^2 = 3 \cdot 0,5968 \cdot 34,41^2 = 2119,91 \text{ W}$$

Ecuación 4.23

$$P_{cu2} = 3R'_2 I'^2_2 = 3 \cdot 0,6258 \cdot 24,98^2 = 1171,49 \text{ W}$$

Ecuación 4.24

Finalmente y a partir de la Ecuación 2.21, se calcula la potencia eléctrica de entrada.

$$P_e = P_{cu1} + P_{fe}(0) + P_{cu2} + P_u + P_{\text{érd Mec}}$$

$$P_e = 2119,91 + 1171,49 + 14348,33 + 145 = 17784,73 \text{ W}$$

Ecuación 4.25

Se han contrastado los valores mediante el modelo simulado, realizando una medida de la potencia eléctrica activa consumida, como se puede observar en la gráfica de la Figura 4.11.

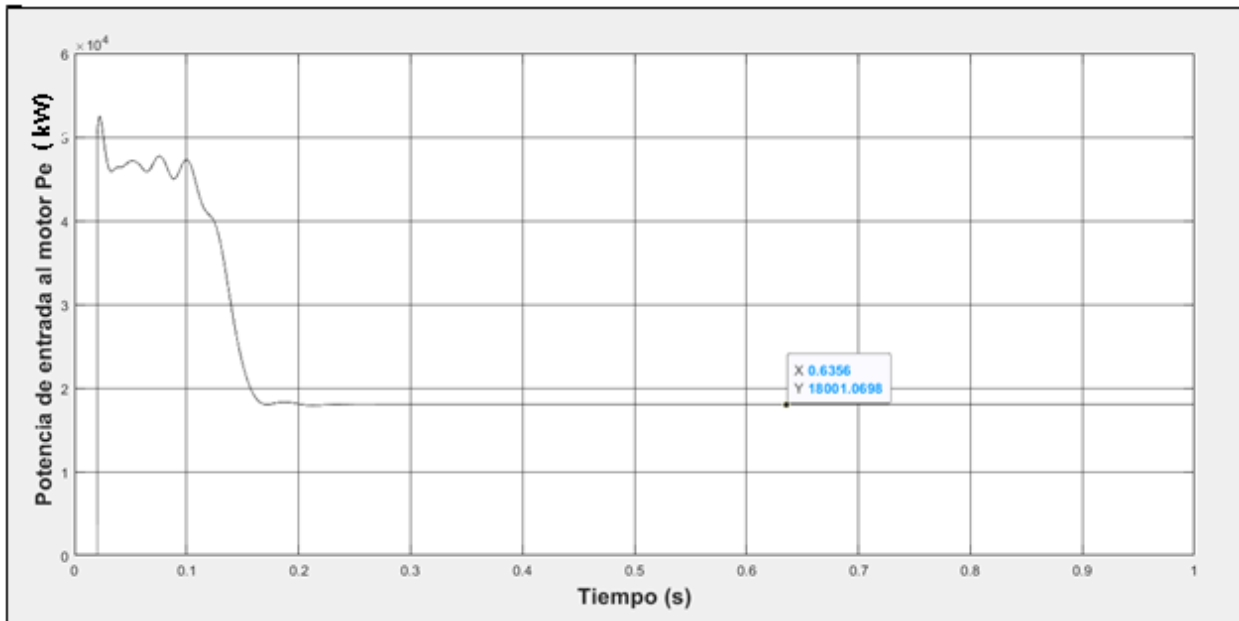


Figura 4.11 Potencia activa consumida.

Como se puede apreciar los valores calculados de potencia eléctrica, son muy similares a los obtenidos por el modelo simulado:

$$P_e \text{ Calculada} = 17784,73 \text{ W} \approx 18001,069 \text{ W } P_e \text{ simulador}$$

Se obtiene el porcentaje de rendimiento del motor a partir de la Ecuación 2.20:

$$\eta = \frac{P_u}{P_e} \cdot 100 = \frac{14348,33}{17784,73} \cdot 100 = 80,68 \%$$

Ecuación 4.26

El mejor rendimiento del motor se ha obtenido, para una codición de carga de **42 Nm**.

$$\text{Contrapar} = 42 \text{ Nm}$$

$$\text{Rendimiento } \eta\% = 85,34 \%$$

4.1.5 Análisis de los parámetros del motor en condición de vacío y en condición de carga.

Es interesante conocer que modificaciones sufrirán los parámetros de un motor cuando se modifica su condición de carga, con el modelo simulado, se han creado dos condiciones, para poder comprobarlo, en la primera la condición de carga será nula, es decir condición de vacío, donde el par resistente o contrapar será nulos, la segunda condición se realiza para la carga habitual de este proyecto, es decir **100 Nm**, de contrapar.

4.1.5.1 Condición de vacío

En condición de vacío el rotor gira de una manera libre, la velocidad del rotor es próxima a la de sincronismo $n_r \approx n_s$ y deslizamiento prácticamente es nulo, si se observan los datos obtenidos mediante el simulador se puede ver que la velocidad es prácticamente la de sincronismo **1500 r.p.m.** y el deslizamiento es prácticamente **0**.

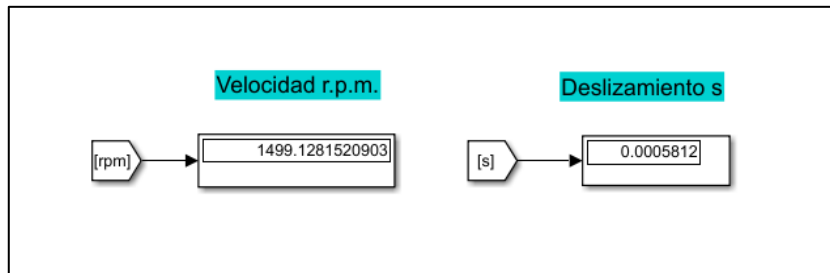


Figura 4.12 Velocidad y deslizamiento en condición de vacío.

Lo que ocurre en estas condiciones es que la resistencia de carga R'_c se convierte en un valor muy alto al ser el deslizamiento tan pequeño, si se observa la Ecuación 4.6, se puede comprobar. Y al hacerse tan grande disminuye la intensidad en el rotor I'_2 .

Como se puede observar en la gráfica de la Figura 4.13, la intensidad del rotor es prácticamente nula.

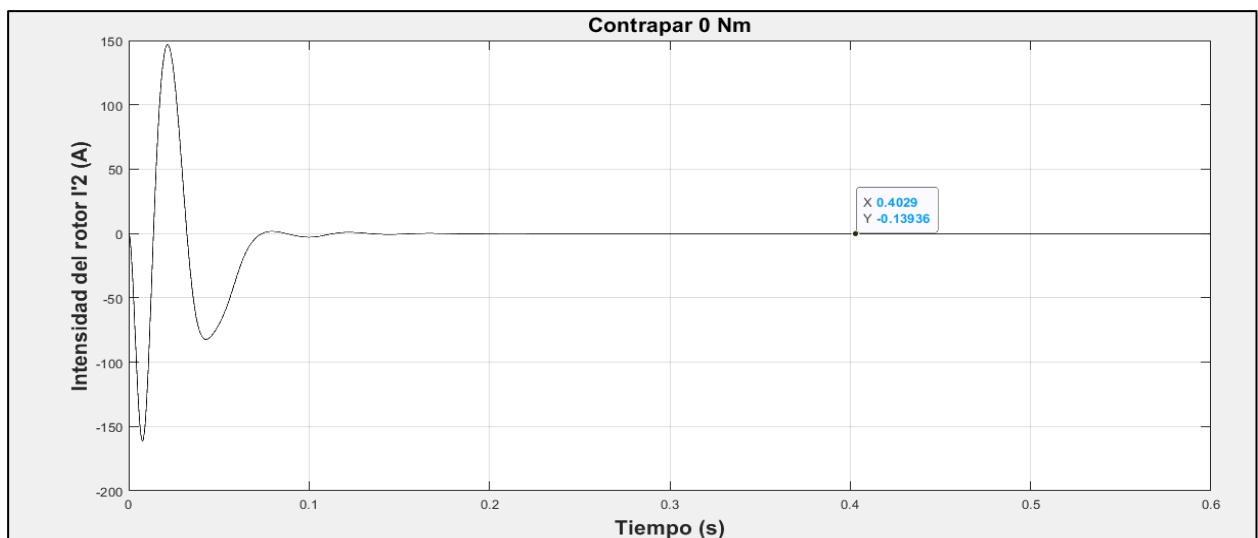


Figura 4.13 Intensidad del rotor en condición de vacío.

Al disminuir la intensidad del rotor, el efecto de la intensidad que atraviesa la reactancia de magnetización X_m aumenta, y aumenta el efecto inductivo del motor, por lo tanto se reduce el factor de potencia. Los valores ya fueron calculados en la Ecuación 4.16 y la Ecuación 4.17, donde:

$$I_1 = 20,52 / -86,37^\circ \text{ A}$$

$$I_2 = 0,21 / -2,94^\circ \text{ A}$$

Si se desprecia la intensidad que circula por el rotor, se puede decir que el circuito equivalente es el de la Figura 4.14.

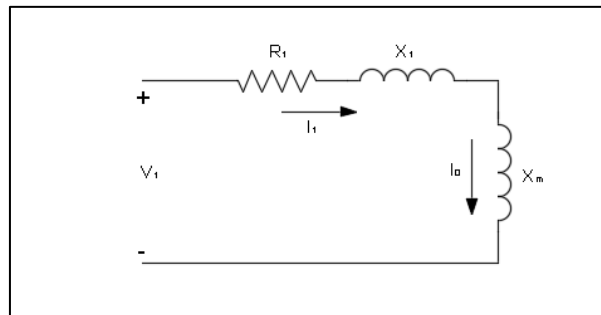


Figura 4.14 Circuito equivalente del motor en condición de vacío.

El factor de potencia será:

$$fp = \cos \varphi = \cos -86,37 = 0,06331$$

Ecuación 4.27

Si se observan los datos aportados por el modelo simulado de la Figura 4.15, se puede comprender que son similares.

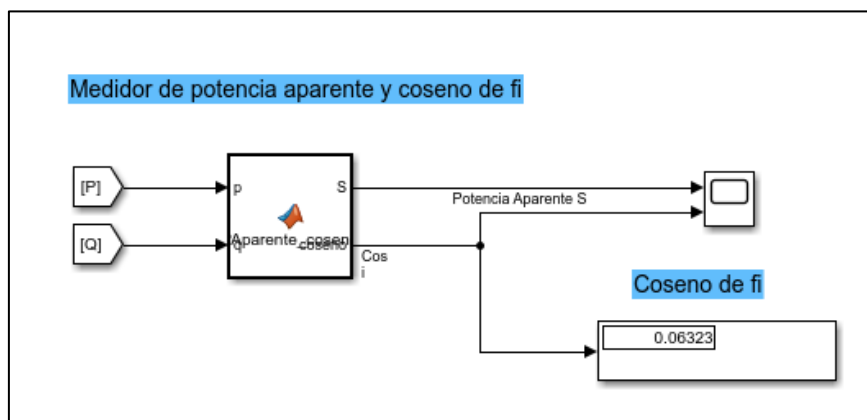


Figura 4.15 Factor de potencia en condición de vacío.

La fuerte carga inductiva del motor, produce un retraso de la intensidad respecto de la tensión, reduciendo así el factor de potencia, como se puede mostrar en la siguiente gráfica.

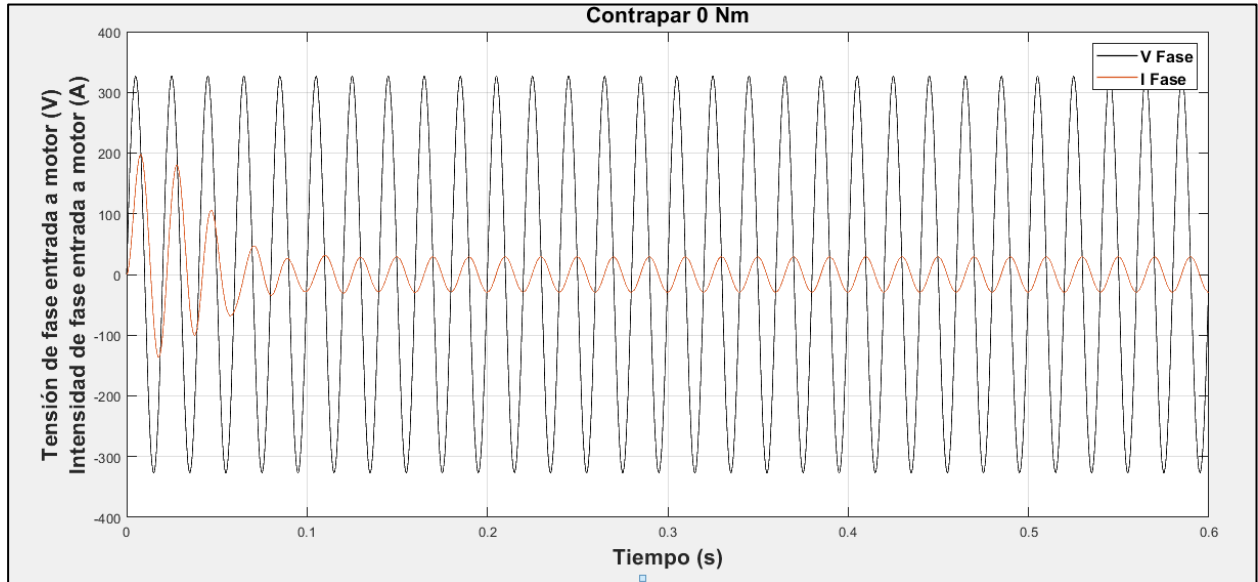


Figura 4.16 Retraso de la intensidad respecto de tensión, para condición de vacío.

4.1.5.2 Condición de carga.

Como se ha mencionado, en este segundo ensayo se establece el contrapar en **100 Nm**, las velocidades de sincronismo y del rotor en este caso serán muy diferentes $n_r \neq n_s$ y el deslizamiento no será nulo.

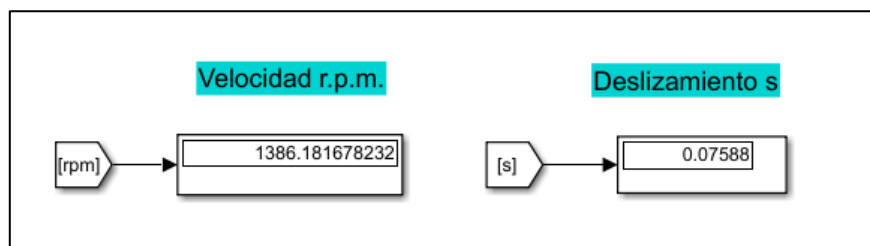


Figura 4.17 Velocidad y deslizamiento para condición de carga 100 Nm.

Se puede comprobar la velocidad ha disminuido y el deslizamiento ha aumentado al colocar en el motor una carga

Al reducirse el deslizamiento aumenta el consumo de intensidad en el rotor I'_2 y también en el estator, consecuencia de la Ecuación 4.5 y de la Ecuación 4.6, de las leyes de Kirchhoff. Así pues el modelo de circuito equivalente que se analiza corresponde al de la Figura 4.2.

Los cálculos obtenidos a partir de la Ecuación 4.5 y la Ecuación 4.6 serán los siguientes:

$$I_1 = \frac{400/\sqrt{3}}{0,5968 + 0,1098j + 11,121j - \frac{(11,121j)^2}{11,121j + \frac{0,6258}{0,07588} + 1,71j}} = 34,71 \angle -41,52^\circ \text{ A}$$

Ecuación 4.28

$$I'_2 = (25,99 + 23j) \frac{11,121j}{11,121j + \frac{0,6258}{0,07588} + 1,71j} = 25,31 \angle -8,83^\circ \text{ A}$$

Ecuación 4.29

En la siguiente gráfica de la Figura 4.18, se puede ver el incremento sufrido por la intensidad del rotor I'_2 , también se puede observar que la frecuencia ha aumentado debido a la relación de frecuencias entre el rotor y el estator, ofrecida por la Ecuación 2.9.

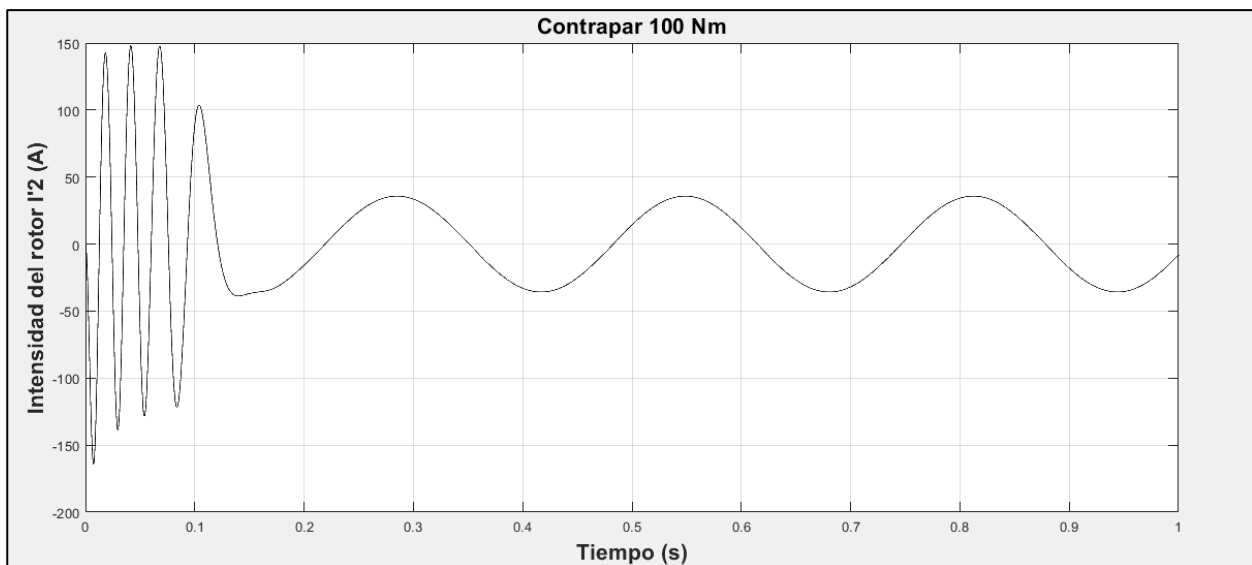


Figura 4.18 Intensidad de rotor, en condición de carga de 100 Nm.

Al ser la tensión de fase de entrada $V = 230,94 + 0j$, se obtiene un ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad de:

$$fp = \cos \varphi = \cos -41,52 = 0,7487$$

Ecuación 4.30

Se puede apreciar que al aumentar la carga, aumenta el factor de potencia.

En la Figura 4.19, se puede ver, que los resultados de simulación, son parecidos

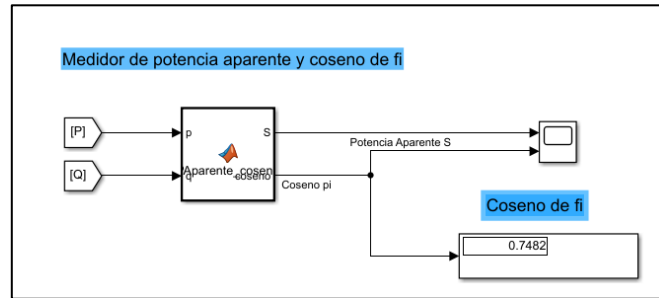


Figura 4.19 Factor de potencia para condición de carga de 100 Nm.

En la gráfica de la Figura 4.20, se puede ver que la intensidad de entrada al motor ha aumentado y que el retraso de la intensidad respecto de la tensión ha disminuido respecto al ensayo en vacío visto en la gráfica de la Figura 4.16.

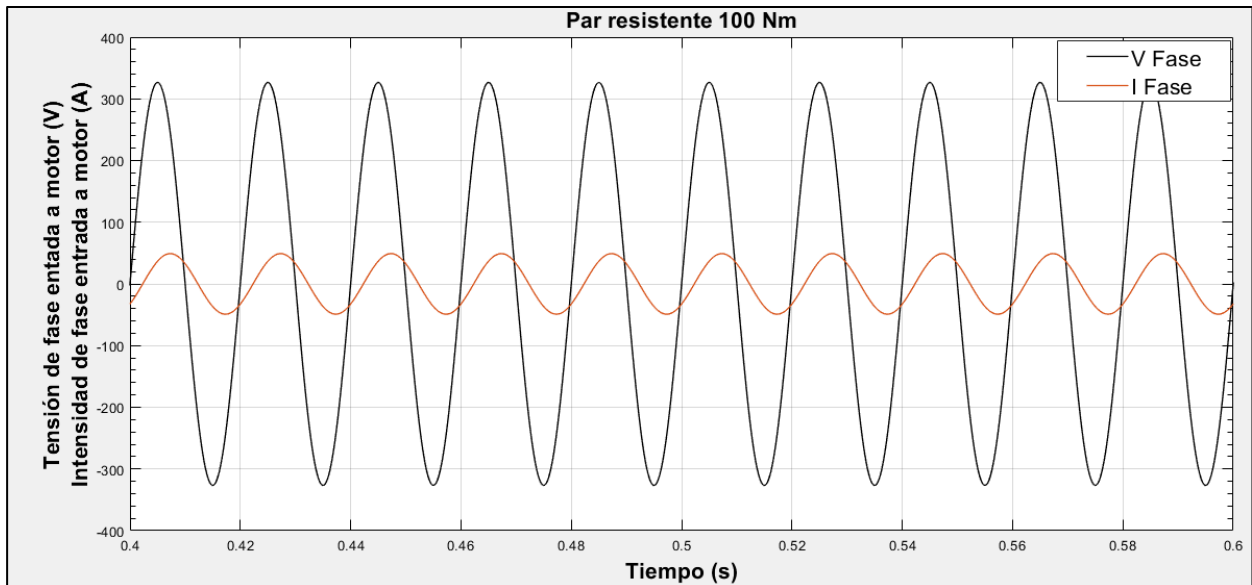


Figura 4.20 Retraso de la intensidad respecto de la tensión, con condición de carga de 100 Nm.

En la gráfica de la Figura 4.21 , se puede observar la evolución del coseno en función del deslizamiento.

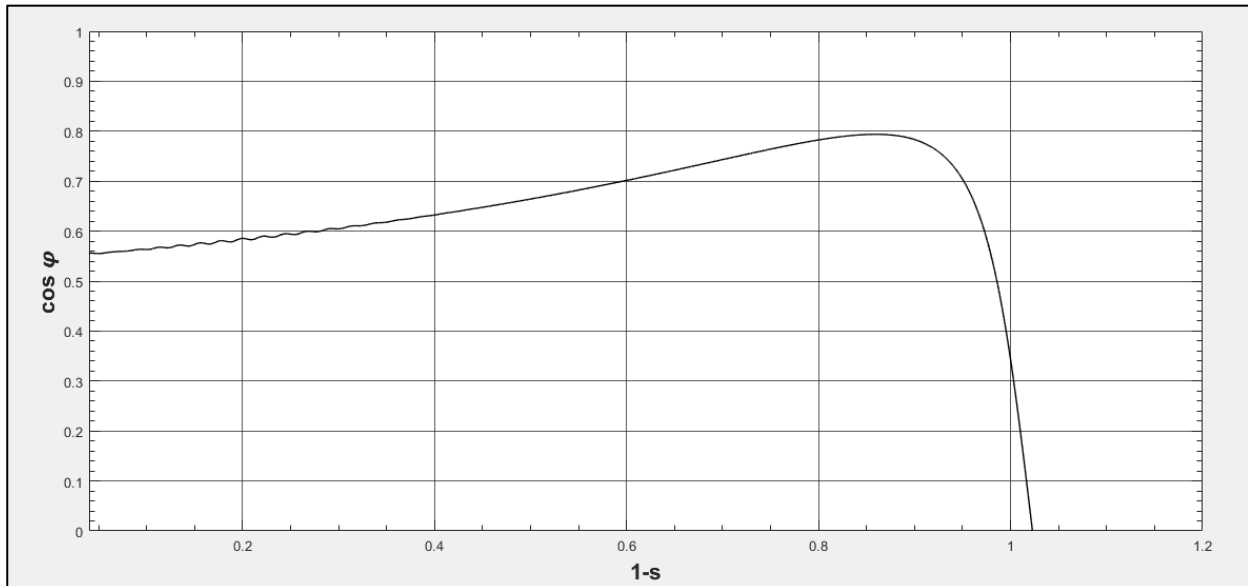


Figura 4.21 Factor de potencia vs deslizamiento.

4.2 Regulación de velocidad mediante reóstato escalonado.

El siguiente sistema, consiste en la regulación de velocidad y de arranque del motor, mediante la conexión de un conjunto de resistencias a los anillos deslizantes del rotor.

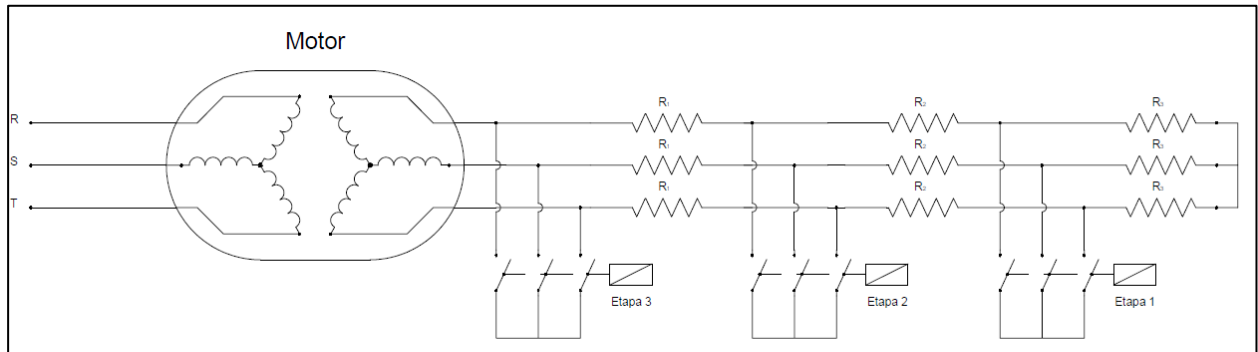


Figura 4.22. Esquema del motor con reóstato escalonado.

En la función como arrancador, las resistencias, una vez empiece el rotor del motor a girar, irán desconectándose, conforme el motor adquiera el par y la velocidad requeridos, para poder realizar un arranque progresivo, frente a una gran carga

La secuencia de funcionamiento será la siguiente.

1. Se alimenta el motor mediante la diferencia de potencial entre las fases R, S, y T. La corriente circula por todo el motor y atraviesa los bloques de resistencias 1, 2 y 3, realizando el cierre de circuito de rotor, con toda la carga de resistencias.
2. Una vez el motor está en funcionamiento, mediante un medidor de revoluciones por minuto, se verifica la velocidad del rotor y conforme va aumentando esta, se van cerrando las diferentes etapas, mediante contactores, con lo cual se reduce la resistencia conectada al rotor.
3. Finalmente, cuando el motor está a punto de llegar al régimen establecido, se cortocircuita por completo el rotor, mediante el cierre de circuito de la Etapa 3.

La introducción, en el rotor modifica las curvas, $T=f(s)$, desplazando el par máximo a valores de mayor deslizamiento, pero sin modificar el par máximo como se muestra en la figura.

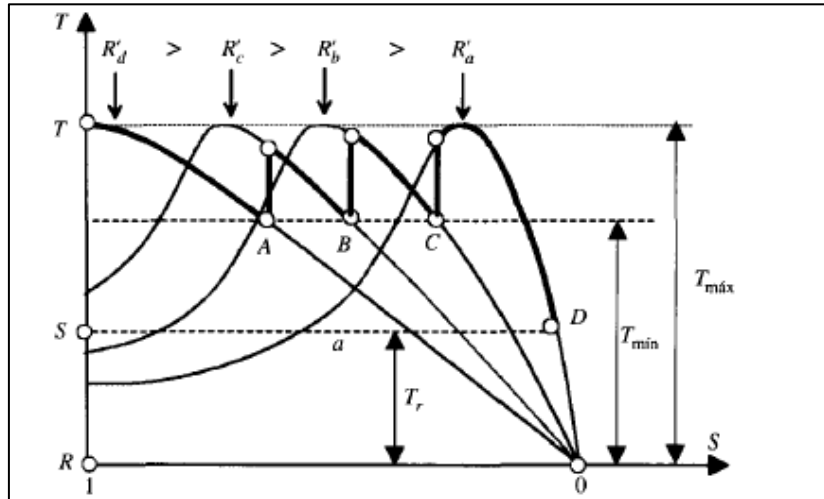


Figura 4.23 Desplazamiento de las curvas par del motor.[1]

En la gráfica de la Figura 4.9, se ha podido comprobar que el motor, no puede superar un par resistente, superior a los 128 Nm y que los efectos son un aumento en la intensidad del motor, que puede provocar daños internos, en el motor. Así que si desea paliar estos efectos se ha de limitar la intensidad que circula por el motor.

En este caso, al ser el motor un motor de rotor devanado, la opción más sencilla es conectar al devanado del rotor unas resistencias en serie, los efectos producidos, son los siguientes:

Si se traslada al circuito equivalente monofásico (Figura 4.24) se puede comprobar, que:

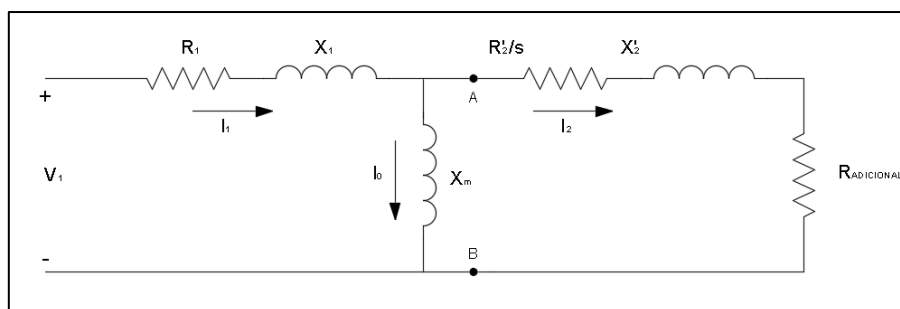


Figura 4.24. Modelo equivalente al circuito con reóstato escalonado.

Al aumentar la resistencia del rotor mediante una resistencia adicional, disminuye la intensidad I'_2 y al disminuir esta, disminuye la de intensidad de entrada al motor I_1 .

Puesto que:

$$I_1 = I_0 + I'_2$$

Ecuación 4.31

Otro efecto que podremos apreciar, es la variación de velocidad del motor en función de la resistencia adicional, mediante la Ecuación 2.18 y la Ecuación 2.19, se tiene

$$P_u = P_{mi} - \text{Pérd Mec}$$

$$P_u = \omega_r T_u$$

Por simplificación, si despreciamos las pérdidas mecánicas[2];

$$P_u = P_{mi}$$

Ecuación 4.32

Y a partir de la Ecuación 2.17:

$$P_{mi} = 3I'^2_2 R'_2 (1-s)/s$$

Por lo tanto al aumentar R'_2 (con resistencias adicionales), podemos mantener el par, pero disminuye la intensidad del rotor I'_2 , disminuye la velocidad del rotor ω_r y por consiguiente la potencia mecánica interna P_{mi} y útil P_u puesto que[2]:

$$P_{mi} = \omega_r T_u$$

Ecuación 4.33

$$\frac{3I'^2_2 R'_2 (1-s)/s}{T_u} = \omega_r$$

Ecuación 4.34

Se ha de notar que si se observa la relación, desde otro punto de vista, despreciando de nuevo las pérdidas mecánicas y considerando el momento del arranque en que $s = 1$, se obtiene la relación[2].

$$\omega_r = (1-s) \cdot \omega_s \quad T_u = \frac{3I'^2_2 R'_2}{\omega_s}$$

Ecuación 4.35

Siendo la potencia disipada en el rotor:

$$P_{cu2} = 3I_2'^2 R_2'$$

Entonces podemos decir:

$$T_u = \frac{P_{cu2}}{\omega s}$$

Ecuación 4.36

Se llega a la conclusión que el par del rotor parado, es proporcional a la potencia disipada en el mismo, e inversamente proporcional a la velocidad del campo giratorio. Por lo tanto al aumentar la resistencia de rotor y disminuir la velocidad se obtiene un mayor par en el rotor. También se ha de decir, que es proporcional al cuadrado de la intensidad, pero que esta, no puede rebasar la nominal del motor, por mucho tiempo ya que se produce el efecto Joule con el consiguiente calentamiento y pérdida de rendimiento del motor. [2]

Finalmente si se desprecian las pérdidas mecánicas y se deprecia la resistencia del rotor, se puede expresar el par útil del motor como:

$$T_u = \frac{3I_2'^2 Radicional1}{\omega r}$$

Ecuación 4.37

Para el cálculo de la resistencia adicional aplicaremos la Ecuación 2.26.

$$s_{max} = \frac{R_2'}{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2')^2}$$

Se calculará una resistencia adicional **Radicional1**, para disponer del máximo par, en concreto en el arranque cuando el deslizamiento s, sea igual a 1

$$1 = \frac{R_2' + Radicional1}{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2')^2}$$

Ecuación 4.38

Teniendo entonces la resistencia adicional un valor de:

$$Radicional1 = 1,31 \Omega$$

Se ha realizado un escalonamiento mediante interruptores, para ello se ha dividido la resistencia en tres, con lo cual se ha conseguido un arranque del motor en 3 etapas, el valor de las resistencias es:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{1,31}{3} = 0,436\Omega$$

Se ha realizado el modelado mediante el simulador.

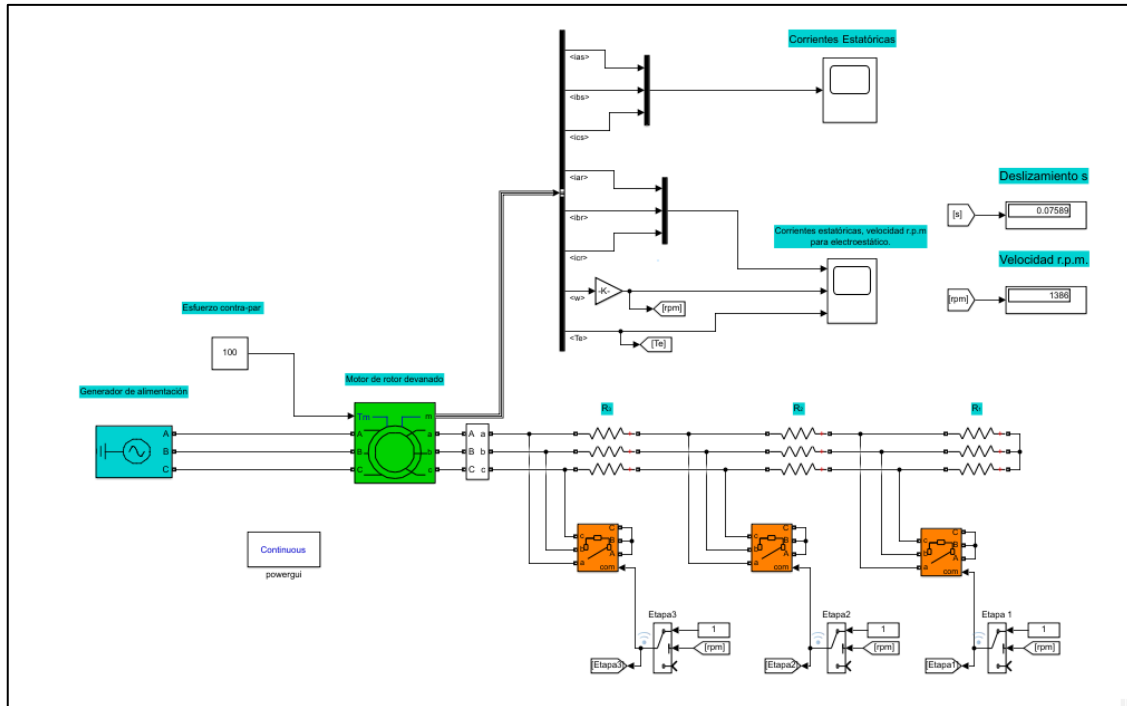


Figura 4.25. Esquema proporcionado por el simulador, regulación de la velocidad del motor, mediante reóstato escalonado.

4.2.1 Cálculo de la intensidad de arranque.

A partir de la Ecuación 4.5 y la Ecuación 4.6 de las leyes de Kirchhoff se obtiene la intensidad de arranque.

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1 + X_1 - \frac{X_m^2}{X_m + \frac{R'_2 + Radicional1}{s}} + X'_2} = 85,25 / -41,83^\circ A$$

Ecuación 4.39

$$I'_2 = I_1 \cdot \frac{jX_m}{jX_m + \frac{R'_2 + Radicional1}{s} + jX'_2} = 73,06 / -33,24^\circ A$$

Ecuación 4.40

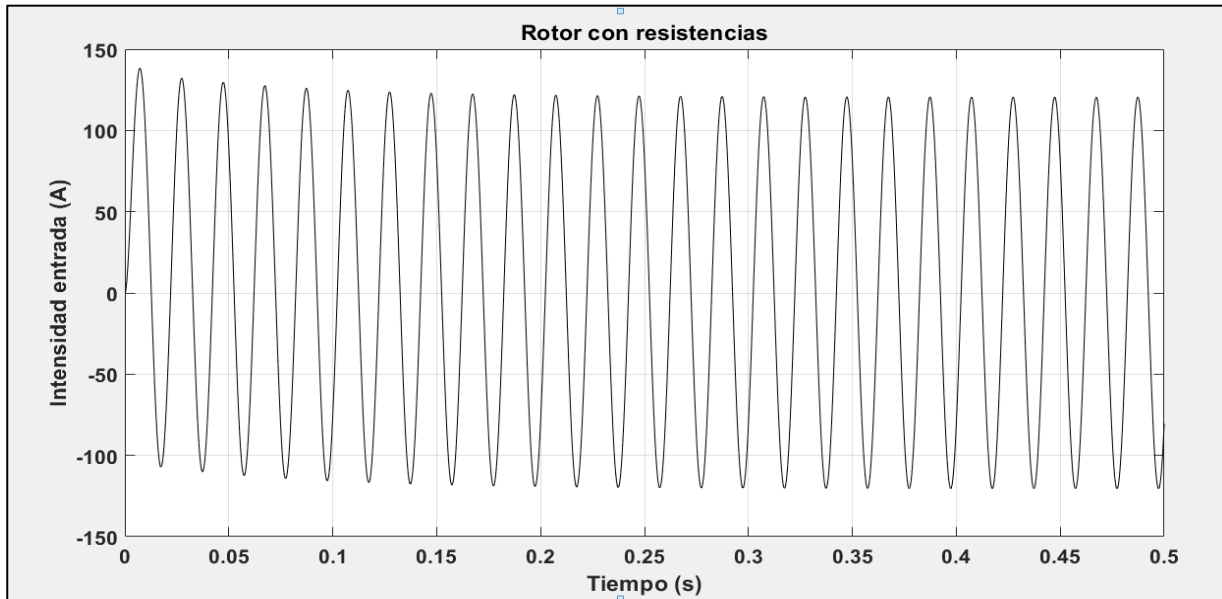


Figura 4.26 Intensidad de arranque con regulación mediante reóstato escalonado.

En la gráfica de la Figura 4.26 se aprecia que la intensidad de pico, se sitúa en torno a 125 A siendo 84,6A la intensidad *r.m.s.*

Como puede apreciarse los cálculos son muy similares:

$$I \text{ de arranque (Modelo Simulado)} = 84,60 \text{ A}$$

$$I \text{ de arranque (Calculada)} = 85,25 \text{ A}$$

Se ha realizado mediante el simulador una gráfica, que puede observarse en la Figura 4.27, de la intensidad *r.m.s.*, respecto a la velocidad, en ella se puede apreciar que respecto al arranque mediante rotor cortocircuitado, la intensidad ha disminuido, también se puede ver que existen varios picos, estos corresponden a los escalonamientos, puesto que al reducirse la resistencia de carga, aumenta la intensidad y finalmente se ve que, a medida que la velocidad del rotor se acerca a la velocidad de los campos magnéticos del estator la intensidad se reduce.

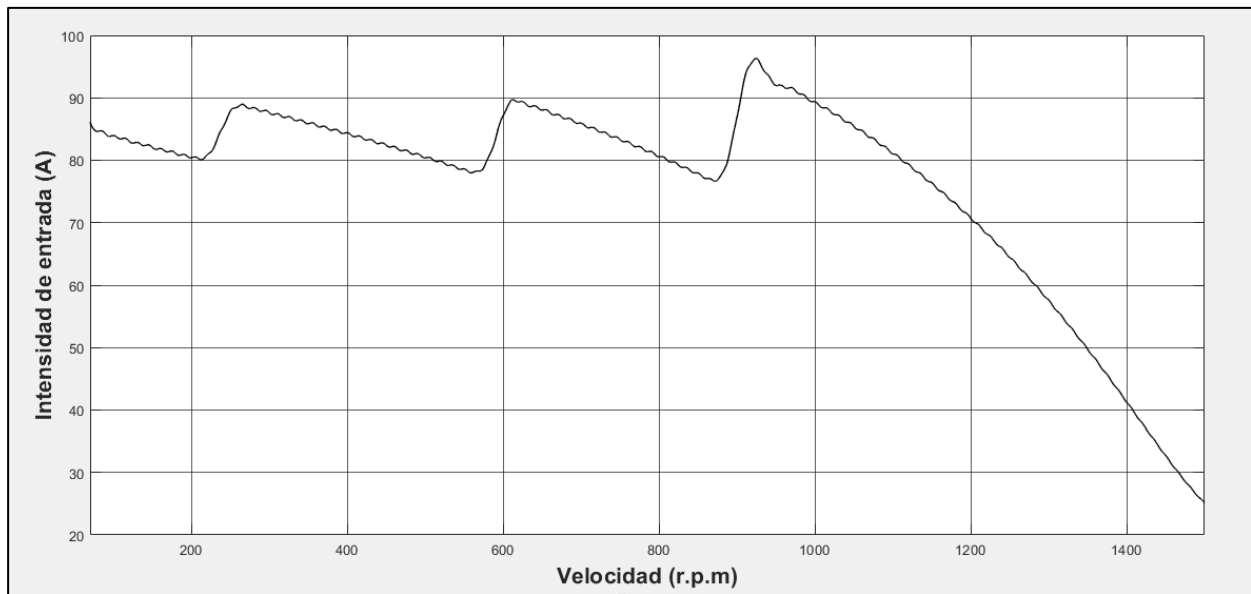


Figura 4.27 Variación de la intensidad con sistema de reóstato escalonado.

4.2.2 Par de torsión de la máquina

Mediante la resistencia adicional calculada en la Ecuación 4.38 y aplicando la Ecuación 2.24 se obtiene el par de arranque desarrollado por la máquina, considerando el deslizamiento inicial igual a 1.

$$T = \frac{1}{ws} \cdot \frac{(3 \cdot V_{th}^2) \cdot \left(\frac{R'_2 + Radicional1}{s} \right)}{\left(R_{th} + \frac{R'_2 + Radicional1}{s} \right)^2 + (X_{th} + X'_2)^2}$$

Ecuación 4.41

$$T = \frac{1}{157,08} \cdot \frac{(3 \cdot 228,42^2) \cdot \left(\frac{0,6258 + 1,31}{1} \right)}{\left(0,5734 + \frac{0,6258 + 1,31}{1} \right)^2 + (0,13862 + 1,71)^2} = 197,36 \text{ Nm}$$

Ecuación 4.42

Como se muestra en la Figura 4.28, se ha conseguido, a partir de las resistencias, que el motor pueda tener un arranque con un par resistente de 191,85 Nm.

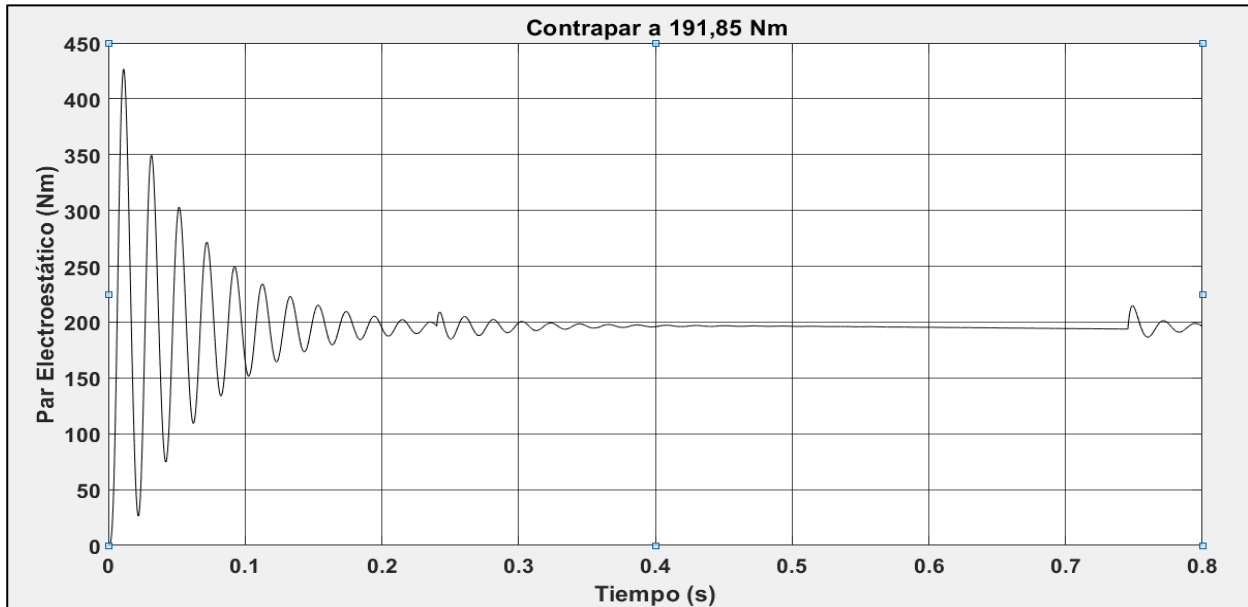


Figura 4.28 Par motor con contrapar 191,85 Nm.

Despreciando el coeficiente de fricción, se observa que existen diferencias entre el par calculado y el par que puede vencer la máquina.

$$Par\ calculado = 197,36\ Nm \neq 191,85\ Nm = Par\ simulink$$

Estas diferencias, se deben a que existe un momento polar de inercia, de las masas y es un parámetro fijado por el fabricante, en este caso, el simulador lo facilita en la tabla 1, siendo $J = 0,05\ kg \cdot m^2$, aplicando la ecuación de equilibrio de momentos [1].

$$T - T_r = J \cdot \frac{d\omega_r}{dt}$$

Ecuación 4.43

Dónde: $T = Par\ electromagnético\ del\ motor\ [N \cdot m]$, $T_r = Par\ resistente\ [N \cdot m]$

$J = momento\ de\ inercia\ [kg \cdot m^2]$, $\omega_r = velocidad\ angular\ del\ rotor\ [rad/s]$

Desarrollando la formula anterior se obtiene:

$$\int_{\omega_{ri}}^{\omega_{rf}} d\omega = \frac{T - T_r}{J} \cdot \int_{t_i}^{t_f} dt$$

$$\omega_{rf} - \omega_{ri} = \frac{T - T_r}{J} \cdot (t_f - t_i) \quad T = J \cdot \frac{\omega_{rf} - \omega_{ri}}{t_f - t_i} + T_r$$

Ecuación 4.44

Se han realizado los cálculos para obtener el par electromagnético y se resumen en la gráfica de la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Par electromagnético calculado en cada etapa del motor.

J (kg*m^2)	Tr (Nm)	t final (s)	t inicial (s)	ωr final (rad/s)	ωr inicial (rad/s)	Velocidad del rotor final (r.p.m)	Número de etapa	T (Nm)
0,05	191,88	0,2394	0	20,94	0	200	Etapa 1	196,25
0,05	191,88	0,7392	0,2394	57,60	20,94	550	Etapa 2	195,55
0,05	191,88	1,7941	0,7392	89,74	57,60	857	Etapa 3	193,40
0,05	191,88	2,1987	1,7941	117,21	89,74	1119	Final	195,27

En ella, se puede apreciar los diferentes pares electromagnéticos, desarrollados para cada etapa, de manera que, conociendo la velocidad del motor, a la cual se cortocircuita cada bloque de resistencias, se ha obtenido el tiempo de cada etapa. Como se puede apreciar el primer interruptor actúa cuando el rotor del motor llega a la velocidad de 200 r.p.m., el segundo interruptor a 550 r.p.m., el tercero a las 857 r.p.m. donde los anillos del rotor quedan en situación de cortocircuito, hasta llegar a la velocidad de régimen de 1119 r.p.m

En la gráfica de la Figura 4.29 se pueden ver los tiempos de acción de cada interruptor.

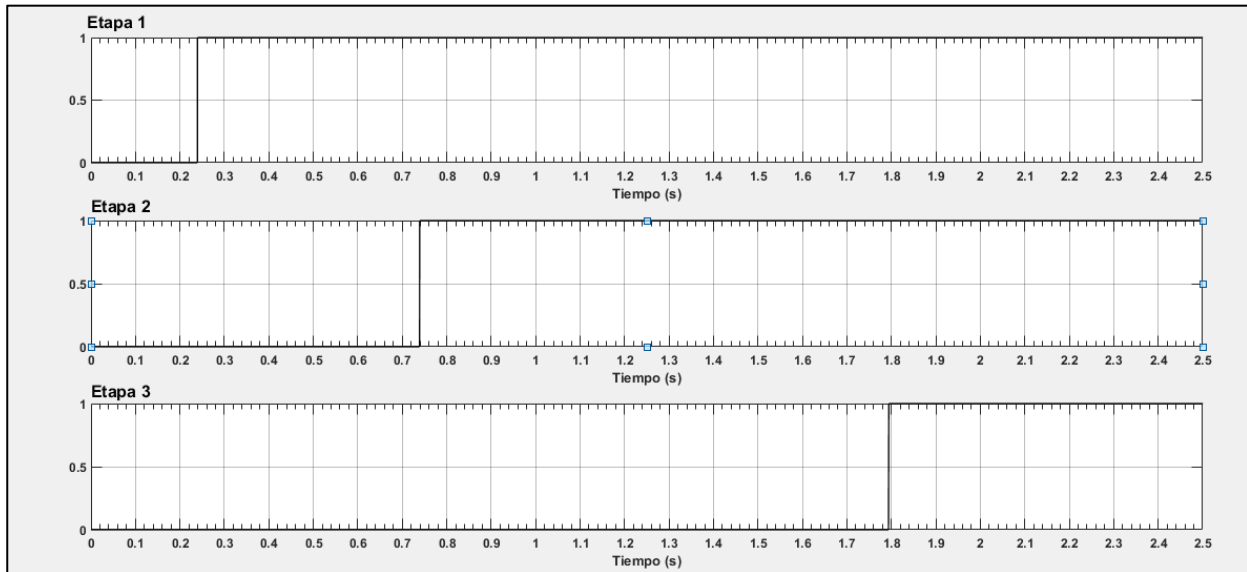


Figura 4.29 Tiempos de conmutación de cada etapa del motor.

Si ahora se comparan los pares, puede apreciarse que son más aproximados:

$$Par\ calculado = 197,36\ Nm \approx 195,27\ Nm = Par\ del\ modelo\ simulado$$

Se ha comprobado este desajuste mediante el simulador, para ello se modifican el parámetro de momento de inercia del motor situándolo en el punto más bajo que admite el simulador sin dar error, pasando de **0,05 kgm^2** a **0,002 kgm^2** , también se ha reducido el coeficiente de fricción de **0,005859 Nms** a **0 Nms** .

Con estas modificaciones en el motor, se ha podido comprobar que el motor puede llegar a aumentar el par electrostático hasta **196,5 Nm** y que las diferencias se deben al momento de inercia en mayor medida y al coeficiente de fricción utilizados por el modelo.

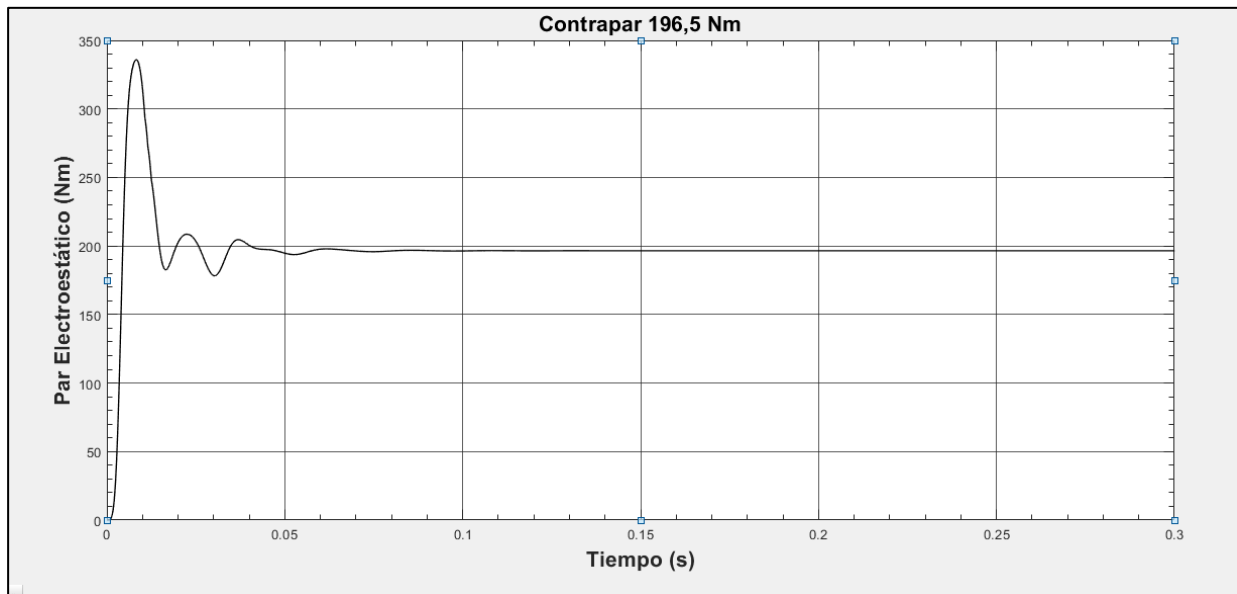


Figura 4.30 Par de motor, con momento de inercia y coeficiente de rozamiento, reducidos.

En la gráfica se puede apreciar que al reducir el momento de inercia y el coeficiente de rozamiento se producen menos oscilaciones que en las condiciones habituales, como se muestra en la gráfica de la Figura 4.30.

Aplicando la Ecuación 2.26, se calcula el deslizamiento, para los diferentes valores de resistencia:

$$s_{max} = \frac{R'_2 + Radicional1}{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2}$$

En la siguiente Tabla 4.3 se han obtenido los pares máximos y los puntos de deslizamiento y velocidad donde se obtienen, mediante cálculo.

Tabla 4.3. Puntos de par máximo de motor (Calculados)

Radicional1 (Ω)	Velocidad (r.p.m.)	Par Electromagnético Te(Nm)	Deslizamiento s
3 x 1,310	0,00	197,37	1,000
3 x 0,873	340,89	196,61	0,773
3 x 0,436	678,85	190,27	0,547
0	1016,03	127,61	0,323

En gráfica de la Figura 4.31 se aprecia como varía la velocidad del rotor en función de la resistencia adicional y puede verse claramente que conforme la resistencia disminuye la velocidad del rotor aumenta, hasta llegar a su punto máximo, en este caso el par resistente es de 100 Nm

Se aprecia, que conforme se van conmutando las resistencias el motor pasa de una curva de par a otra.

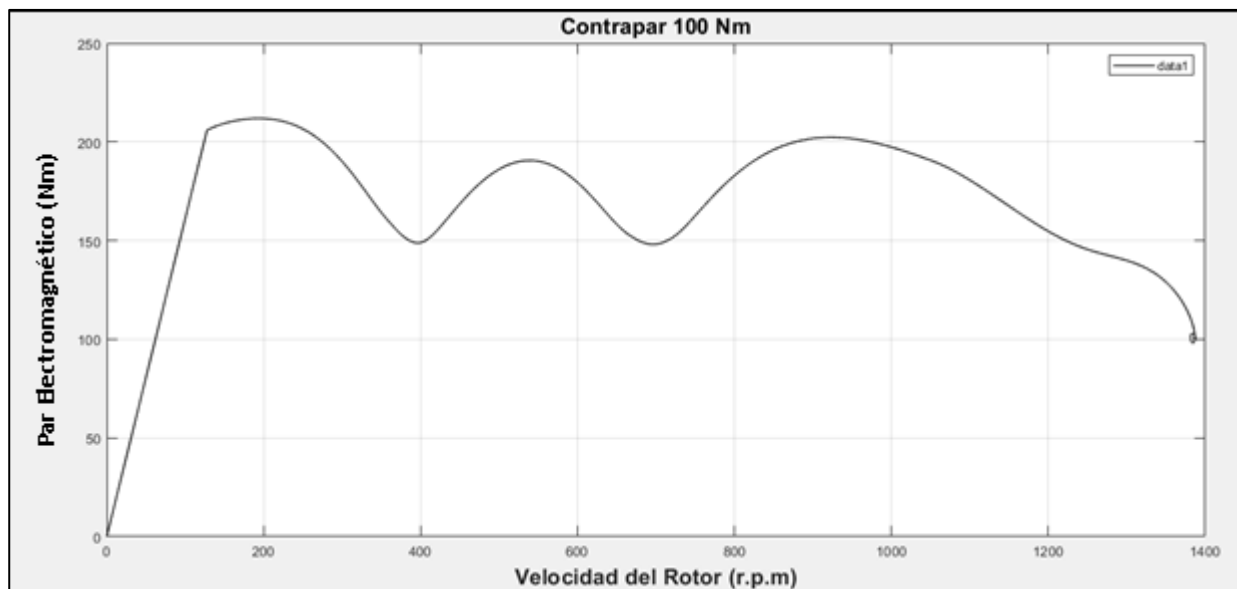


Figura 4.31 Par vs Velocidad condición de carga 100 Nm.

En la gráfica de la Figura 4.32, se puede ver, que el motor ofrece un par sostenido muy alto para casi todos los rangos de deslizamiento, o diferentes rangos de velocidad. En la curva se aprecian los momentos en los que varía la resistencia conectada al rotor.

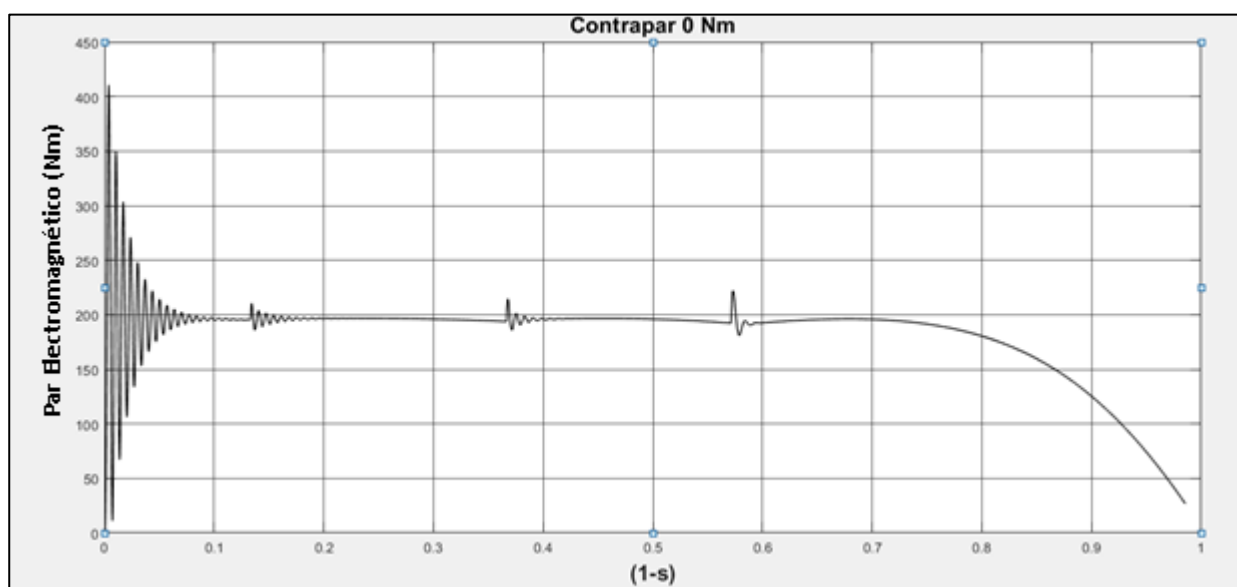


Figura 4.32 Par vs velocidad, condición de carga en vacío.

A partir de la Ecuación 4.41 y la Ecuación 2.8, se ha calculado el deslizamiento y la velocidad para las distintas etapas de regulación de velocidad del motor

Tabla 4.4 Valores de velocidad y deslizamiento, para las diferentes etapas.

Datos calculados para Par resistente 100 Nm		
Radiconal1 (Ω)	Deslizamiento s	Velocidad (r.p.m.)
1,31	0,228842	1157
0,873	0,177182	1234
0,436	0,125522	1312
0	0,07476	1388

4.2.3 Balance de potencia del sistema

Se ha realizado un balance de potencia, para la condición de carga de **100 Nm**, para las cuatro etapas en que funciona el motor, a partir del simulador mediante la conexión y desconexión de bloques de resistencias se ha obtenido el deslizamiento, la velocidad del rotor, la potencia eléctrica de entrada activa y reactiva.

A partir de la Ecuación 4.39 y la Ecuación 4.40 de las leyes de Kirchhoff se ha obtenido la intensidad del rotor y del estator para cada etapa:

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1 + jX_1 - \frac{jX_m^2}{X_m + \frac{R'_2 + jRadiconal1}{s} + jX'_2}}$$

Ecuación 4.45

$$I'_2 = I_1 \cdot \frac{jX_m}{jX_m + \frac{R'_2 + Radiconal1}{s} + jX'_2}$$

Ecuación 4.46

Como se puede observar el deslizamiento afecta, tanto a la resistencia propia del rotor R'_2 , como a la resistencia adicional que está conectada a los anillos deslizantes **Radiconal1**.

También se ha realizado una modificación en la Ecuación 2.21, para adaptarla a la nueva situación.

$$P_e = P_{cu1} + P_{fe} + P_{cu2} + P_u + Prad1 + P\acute{e}rd Mec$$

Ecuación 4.47

Y se ha generado esta nueva ecuación para calcular las perdidas en la resistencia adicional, siendo estas ahora **Prad**:

$$Prad1 = 3 \cdot Radicional1 \cdot I_2'^2$$

Ecuación 4.48

En cuanto a la Ecuación 2.17 de la potencia mecánica interna se tendrá, esta nueva expresión:

$$P_{mi} = \frac{3I_2'^2(R_2' + Radicional1)(1 - s)}{s}$$

Ecuación 4.49

Se ha expuesto en una tabla los resultados obtenidos mediante el simulador y calculados, para poderlos comparar.

Tabla 4.5 Datos calculados para contrapar 100 Nm.

Datos calculados para contrapar 100 Nm										
Etapa	Radicional1 (Ω)	I1 (A)	I'2 (A)	Pcu1 (W)	Pcu2 (W)	Prad1 (W)	Pmi (W)	Pérd Mec(W)	Pu (W)	Pe (W)
1	1,31	34,19	24,74	2093	1149	2406	11979	145	11834	17627
2	0,873	34,19	24,74	2093	1149	1603	12782	145	12637	17627
3	0,436	34,19	24,74	2093	1149	801	13584	145	13439	17627
Final	0	34,41	24,98	2119	1171	0	14493	145	14348	17784

Tabla 4.6 Datos obtenidos del modelo de simulado para contrapar 100 Nm.

Datos modelo simulado para contrapar 100 Nm							
Etapa	Velocidad (r.p.m.)	Deslizamiento s	cos φ	Pu (W)	Rendimiento %	Potencia Reactiva (KVar)	Pe (W)
1	1149	0,234	0,7479	12027	66,89	15960	17980
2	1228	0,181	0,748	12858	71,51	15960	17980
3	1307	0,128	0,7481	13687	76,08	15960	17990
Final	1386	0,076	0,7482	14517	80,65	15960	18000

Como puede observarse al aumentar la resistencia de carga **Radical1** \uparrow , se suceden los siguientes acontecimientos:

- | | | |
|---|----------------------------|--------------|
| ✓ Disminuye la potencia útil del motor. | P_u | \downarrow |
| ✓ Aumenta la potencia disipada en la resistencia de carga. P_{rad1} | \uparrow | |
| ✓ Disminuye la velocidad del motor | Velocidad | \downarrow |
| ✓ Aumenta el deslizamiento del mismo | s | \uparrow |
| ✓ Disminuye el porcentaje de rendimiento | $\eta\%$ | \downarrow |
| ✓ La intensidad se mantiene prácticamente constante | I | \approx |
| ✓ La potencia eléctrica de entrada se mantiene constante | P_e | \approx |

Se puede apreciar que al mantenerse prácticamente constante la potencia absorbida por la carga **P_{rad1}** , es restada de la potencia útil **P_u** .

En la gráfica de la Figura 4.33 se observa la potencia consumida, únicamente por las resistencias en los instantes iniciales al arranque del motor. **P_{rad1}** :

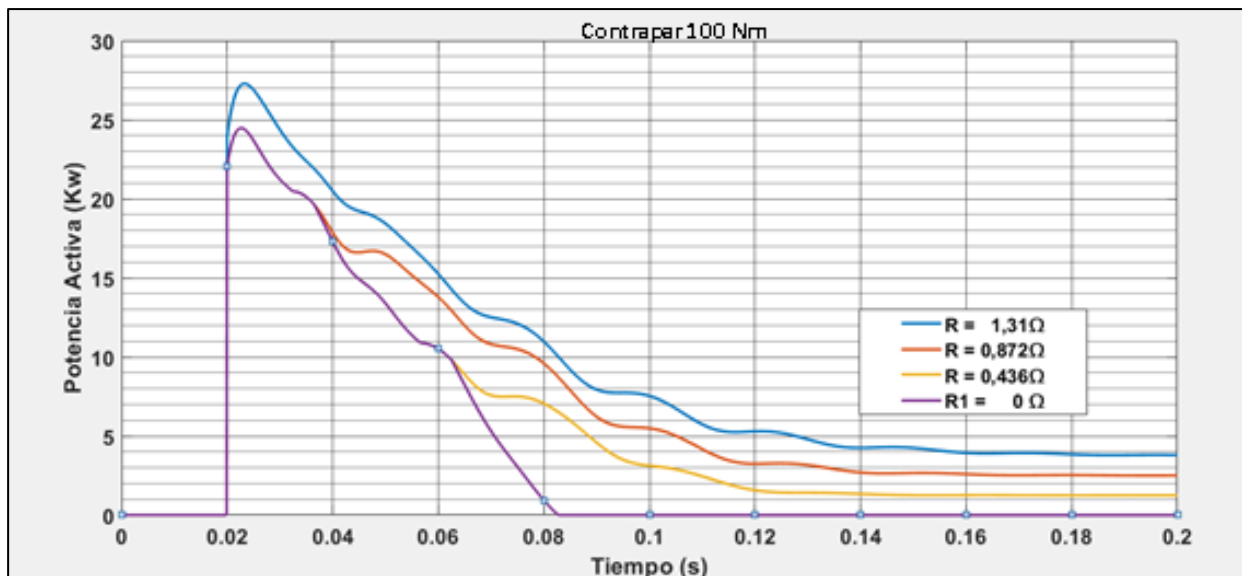


Figura 4.33 Potencia eléctrica consumida por las resistencias del reóstato.

En la gráfica de la Figura 4.34, puede verse, que para las diferentes etapas del reóstato., se puede observar, como el consumo final eléctrico del motor es el mismo para los diferentes valores de resistencias **P_e** :

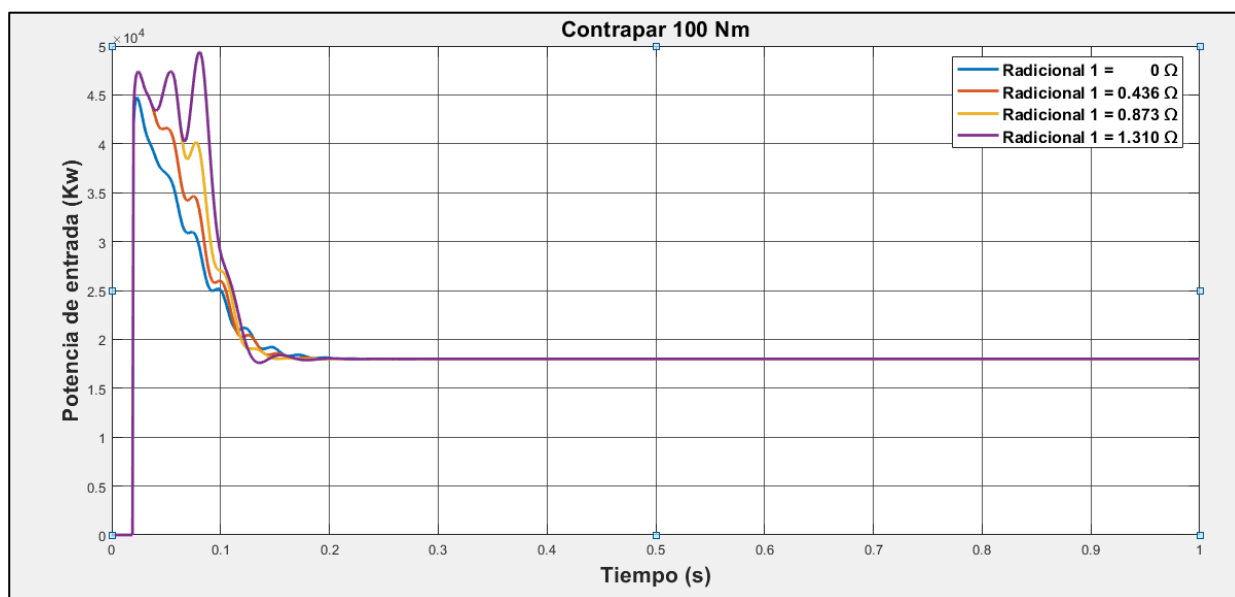


Figura 4.34 Potencia eléctrica consumida por el motor para las diferentes etapas del reóstato.

En la gráfica de la Figura 4.35, se puede ver la variación de velocidad respecto, a los diferentes valores de resistencia.

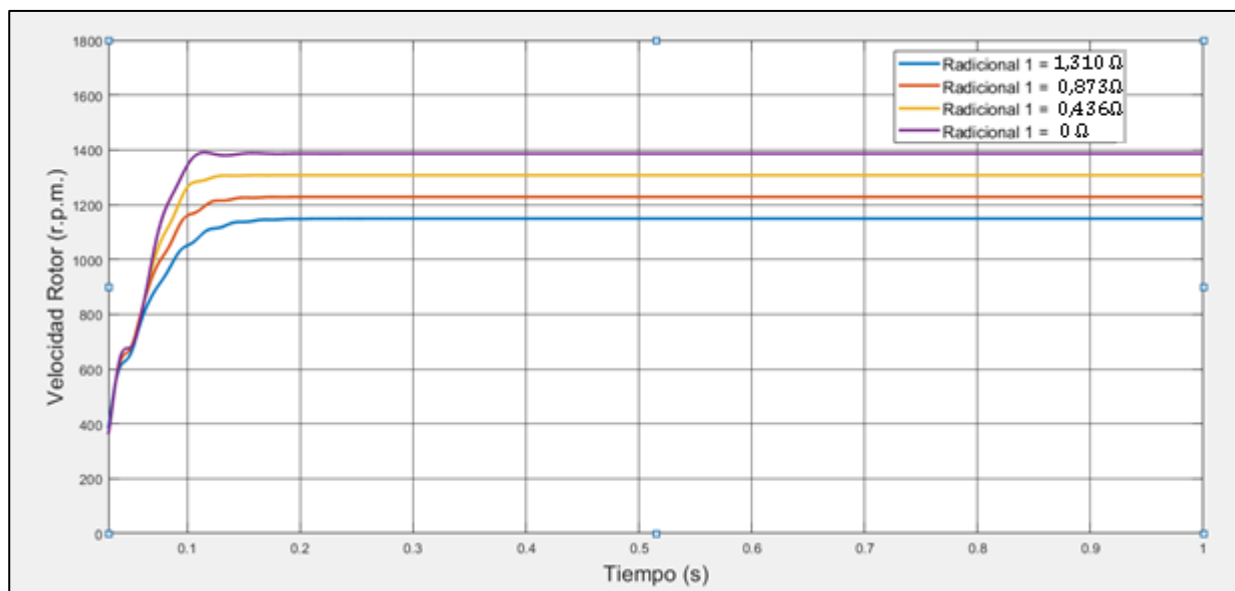


Figura 4.35 Velocidad del rotor, para las diferentes etapas del reóstato.

4.3 Regulación de velocidad por control estático.

El siguiente sistema, al igual que el anterior se basa en la regulación de velocidad y sistema de arranque del motor mediante la conexión de unas resistencias adicionales, a los anillos deslizantes del motor, que limitan la intensidad de entrada al motor en el arranque y regulan la velocidad del rotor una vez el motor está en marcha, pero esta vez se realiza, mediante la conexión de un rectificador de diodos de 6 pulsos trifásico como muestra la Figura 4.36.

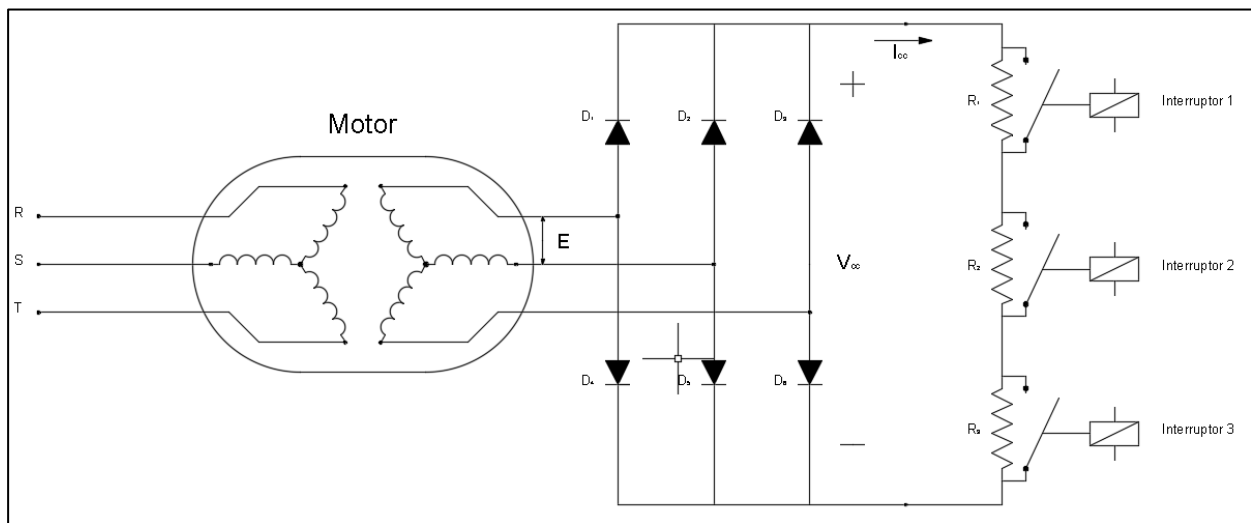


Figura 4.36. Esquema del motor con regulación de velocidad, por control estático.

En el arranque del motor las resistencias 1, 2 y 3 están conectadas, esto produce que la corriente, en ese momento no sea tan elevada. Conforme el motor adquiere velocidad, se van eliminando las resistencias, finalizando con el motor en su régimen nominal y con el rotor cortocircuitado. Mediante la introducción de las resistencias se modifican las curvas de par de par-velocidad del motor.

El puente de diodos actúa como rectificador de la corriente alterna en continua transformando la tensión de la fuerza electromotriz inducida en el rotor en una tensión continua V_{cc} . La relación entre el voltaje de línea del rotor con el circuito abierto E y la tensión V_{cc} nos la ofrece la Ecuación 3.2.

$$V_{cc} = 1,35 E$$

La tensión E se relaciona mediante la fuerza electromotriz inducida del rotor mediante la siguiente ecuación:

$$E = E'_2$$

Ecuación 4.50

Y esta se relaciona con la tensión del rotor parado, en circuito abierto E_2 de esta forma:

$$E'_2 = s \cdot E_2$$

Ecuación 4.51

$$V_{cc} = 1,35 \cdot s \cdot E_2$$

Ecuación 4.52

Se realiza la implementación del modelo simulado

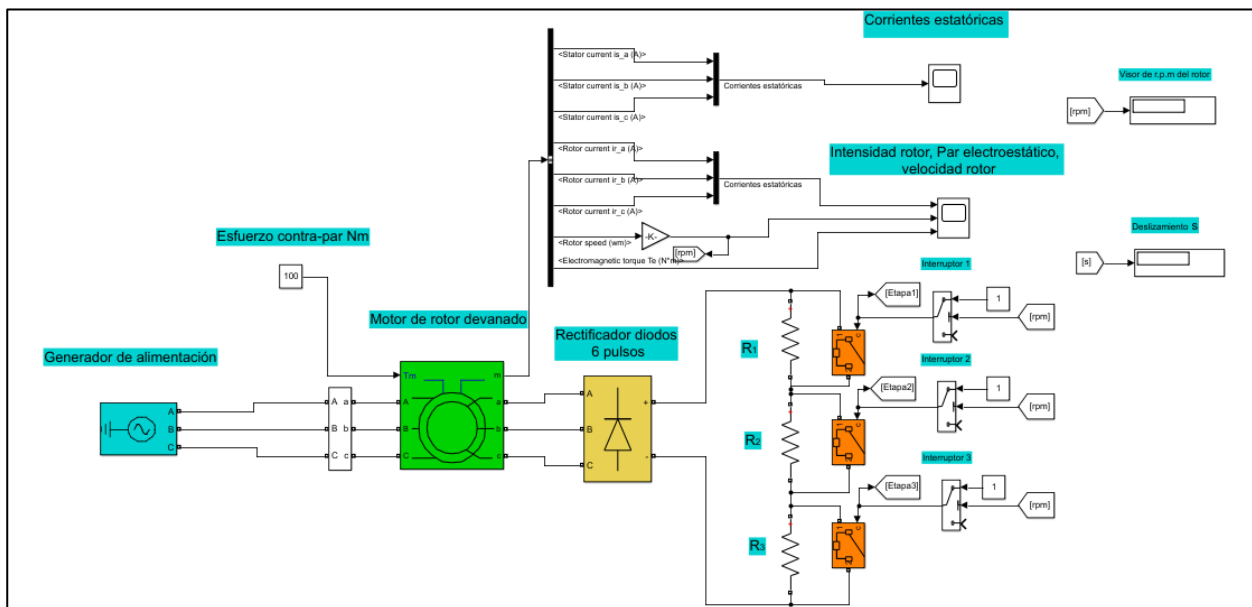


Figura 4.37 Esquema del modelo simulado, para la regulación de velocidad por control estático.

En la gráfica de la Figura 4.38 se puede observar la tensión de salida del rotor E con un valor de tensión de pico $V_p = 21,58 \text{ V}$ y un valor de tensión R.M.S. de $V_{rms} = 15,25 \text{ V}$.

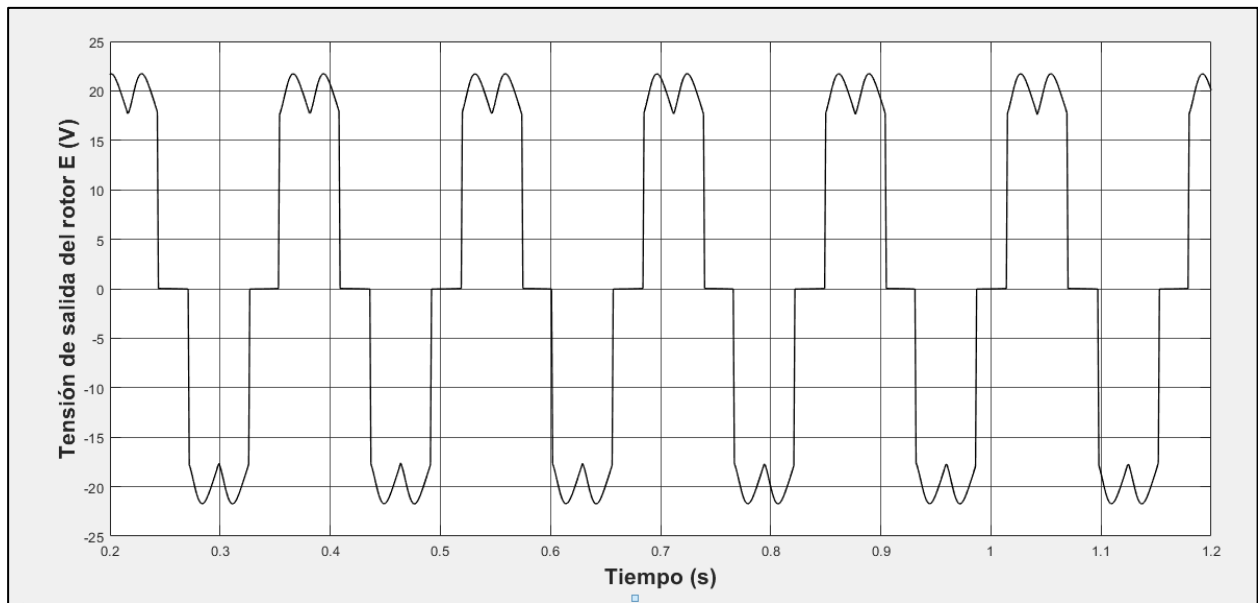


Figura 4.38 Tensión de salida E, del rotor.

Aplicando la Ecuación 3.2, se obtiene la tensión de salida del rectificador:

$$V_{cc} = 1,35 E = 1,35 \cdot 15,25 V = 20,6 V$$

Ecuación 4.53

En la gráfica de la Figura 4.39, se observa la tensión de salida del rectificador que como se había mencionado es

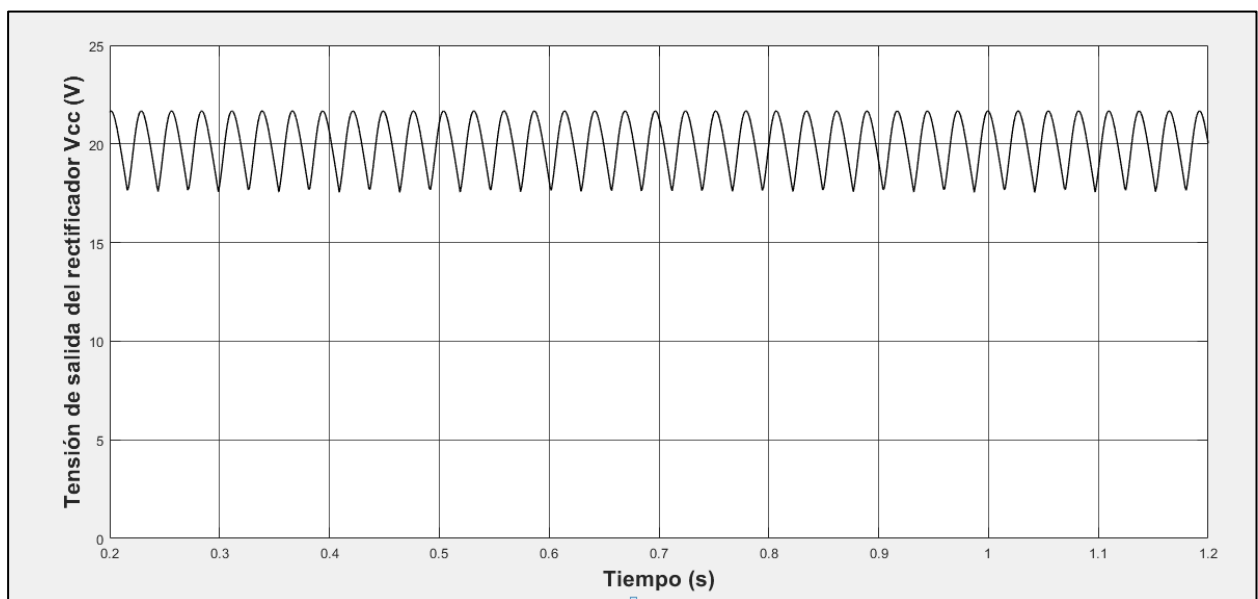


Figura 4.39 Tensión de salida del puente rectificador Vcc.

Con el sistema de regulación de velocidad por control estático se desea obtener el mismo par de arranque que con el sistema de reóstato escalonado, para ello se calculan el bloque de resistencias que irán conectadas a los anillos deslizantes pero esta vez a través del puente rectificador .

A partir de la Ecuación 2.23 de balance de potencias, se puede establecer la siguiente relación:

$$P_T = \frac{P_{cu2}}{s} \quad sP_T = P_{cu2}$$

Ecuación 4.54

Donde P_T , es la potencia transferida al rotor o también llamada “**potencia del entrehierro**”, si despreciamos las pérdidas del cobre del devanado del rotor, se puede establecer [1]:

$$sP_T = V_{cc} \cdot I_{cc}$$

Ecuación 4.55

Si despreciamos las pérdidas mecánicas, $P_u = P_T$ y por lo tanto:

$$P_T = T_u \cdot \omega_r$$

Ecuación 4.56

Entonces:

$$sP_T = s \cdot T_u \cdot \omega_r$$

Ecuación 4.57

$$s \cdot T_u \cdot \omega_r = 2,34 \cdot s \cdot E_{oc} \cdot I_{cc}$$

Ecuación 4.58

$$T_u = \frac{2,34 \cdot E_{oc} \cdot I_{cc}}{\omega_r} = \frac{\text{Radical}2 \cdot I_{cc}^2}{\omega_r}$$

Ecuación 4.59

Por lo tanto el par del motor es proporcional a la corriente continua rectificada I_{cc} . Puesto que la caída de tensión en los diodos es depreciable, la potencia continua absorbida por la carga, ha de ser igual a la potencia suministrada por el devanado del rotor [1].

Para este caso en particular, se ha establecido la siguiente relación, partiendo de la base en que se desprecian las pérdidas mecánicas y la resistencia del rotor, se puede relacionar la ecuación, de par útil, de esto dos modelos analizados.

“Motor de rotor devanado con arranque escalonado, mediante resistencias”

$$T_u = \frac{3I'_2{}^2 \text{Radicional1}}{\omega r}$$

Ecuación 4.60

“Regulación de velocidad por control estático de resistencias adicional, (Ecuación 4.59)”

$$T_u = \frac{I_{cc}^2 \text{Radicional2}}{\omega r}$$

Teniendo en cuenta que la corriente continua rectificada, será el paso de corriente que permitirá el puente rectificador, es decir permitirá el paso de corriente de la primera fase de 0º a 120º, el de la segunda de 120º a 240 º y el de la tercera de 240º a 360º.

De manera que a partir de la Ecuación 3.3 se establece la siguiente relación, entre la intensidad del rotor y la que circula por las resistencias, después del puente rectificador

$$I'_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{cc}$$

Entonces:

$$I_{cc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I'_2 = 1,2254 \cdot I'_2$$

Ecuación 4.61

Evaluando para un circuito equivalente, cómo obtener el mismo par útil de los dos modelos se puede calcular **Radicional2**, de la siguiente forma:

$$\frac{I_{cc}^2 \text{Radicional2}}{\omega r} = \frac{(1,2254 I'_2)^2 \text{Radicional2}}{\omega r} = \frac{3 I'_2{}^2 \text{Radicional1}}{\omega r}$$

$$\text{Radicional2} = \frac{3 \text{Radicional1}}{1,2254^2}$$

Ecuación 4.62

De esta forma, sabiendo que para conseguir el par máximo, se ha calculado una resistencia de $1,31\Omega$, para obtener el par máximo en el modelo, de regulación de velocidad por control estático de resistencias adicional, el valor de la resistencia será:

$$R_{adicional2} = \frac{3 \cdot 1,31}{1,2254^2} = 2,62 \Omega$$

Ecuación 4.63

La resistencia como en el caso anterior se ha dividido en tres, para poder realizar un arranque suave del motor.

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{2,01}{3} = 0,873 \Omega$$

Ecuación 4.64

4.3.1 Cálculo de la intensidad de arranque.

La colocación del puente rectificador, en el circuito hace necesario, que se deban modificar las relaciones de tensión, intensidad y resistencia, a la hora de calcular las intensidades mediante las ecuaciones de Kirchhoff, como se muestra en el circuito equivalente de la Figura 4.40.

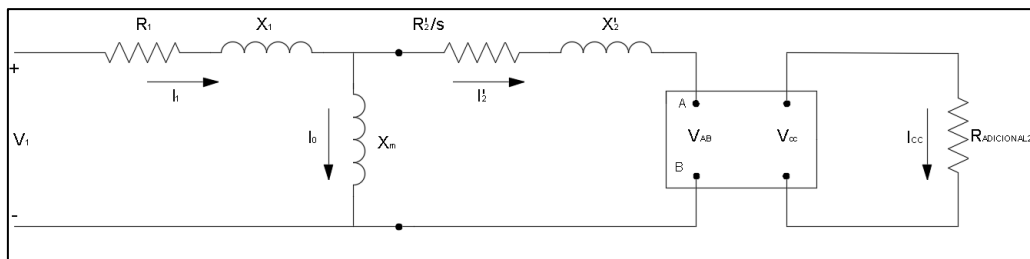


Figura 4.40. Modelo equivalente al circuito de regulación de velocidad por control de velocidad estático.

A partir de las siguientes ecuaciones:

$$V_{cc} = 2,34 V_{AB}$$

$$I_{cc} = 1,2254 I'_2$$

$$\text{Siendo } V_{AB} = \frac{V_{cc}}{2,34} \text{ y } V_{cc} = 1,2254 \cdot I'_2 \cdot R_{adicional2}$$

Ecuación 4.65

Se obtiene que la resistencia vista desde el circuito equivalente sea inferior al valor real que esta dispone puesto que por otras dos ramas del puente rectificador.

$$V_{AB} = \frac{Radicional2 \cdot 1,2254 \cdot I'_2}{2,34}$$

$$Requivalente = \frac{V_{AB}}{I'_2} = \frac{Radicional2 \cdot 1,2254}{2,34} = 0,524 \cdot Radicional2$$

Ecuación 4.66

Las ecuaciones para calcular las intensidades del circuito se obtienen, de la modificación la Ecuación 4.5 y Ecuación 4.6, pertenecientes a las leyes de Kirchhoff.

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1 + jX_1 + jX_m - \frac{jX_m^2}{\frac{R'_2 + 0,524 Radicional2}{s} + X'_2}}$$

Ecuación 4.67

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{jX_m}{jX_m + \frac{R'_2 + 0,524 Radicional2}{s} + jX'_2}$$

Ecuación 4.68

Siendo la intensidad de arranque:

$$I_1 = 83,57 / -41,43^\circ A$$

En la gráfica de la Figura 4.41, se puede observar la intensidad de arranque, la intensidad es ligeramente superior a la del modelo de rotor devanado con arranque escalonado, mediante resistencias siendo la intensidad de pico 127 A, frete a los 125 A del anterior modelo

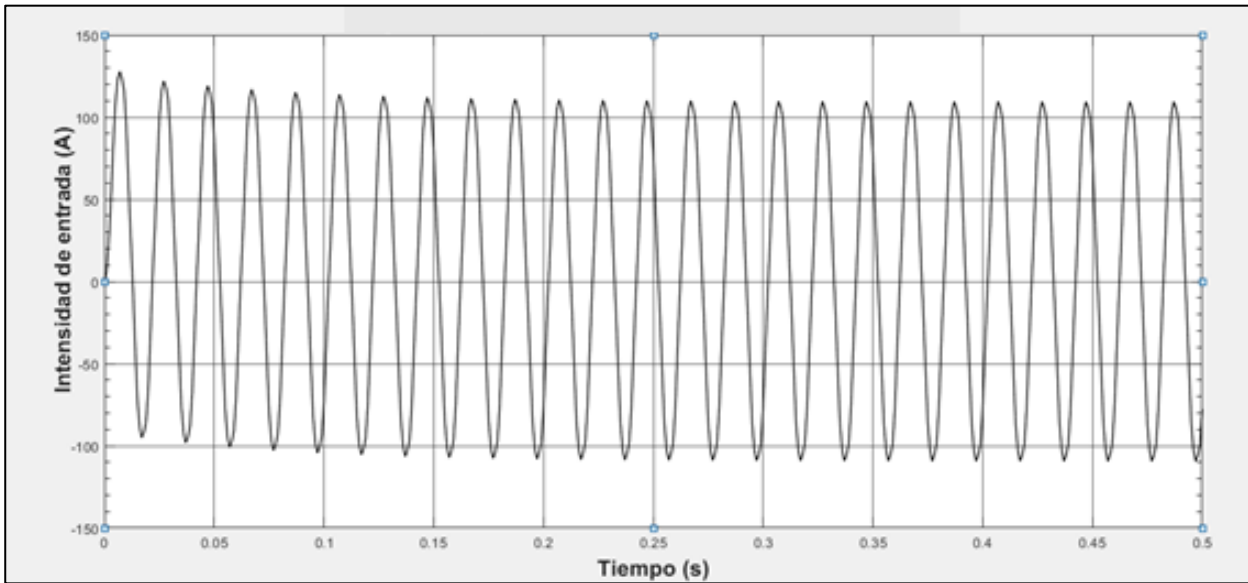


Figura 4.41 Intensidad de arranque mediante sistema de regulación de velocidad por control estático

En la gráfica de la Figura 4.41, se aprecia que la intensidad de pico, se sitúa en torno a 113 A siendo 79,9 A la intensidad *r.m.s.* Si se comparan la intensidad de arranque obtenida por el modelo simulado y la obtenida, mediante los cálculos se puede apreciar que los datos son muy parecidos:

$$I \text{ de arranque (Modelo Simulado)} = 79,90 \text{ A}$$

$$I \text{ de arranque (Calculada)} = 83,57 \text{ A}$$

En la gráfica de la Figura 4.42, se evalúa la intensidad respecto a la velocidad, se puede ver como en el caso anterior que la intensidad se reduce en el arranque y claramente donde se realiza el escalonado para mantener un par constante.

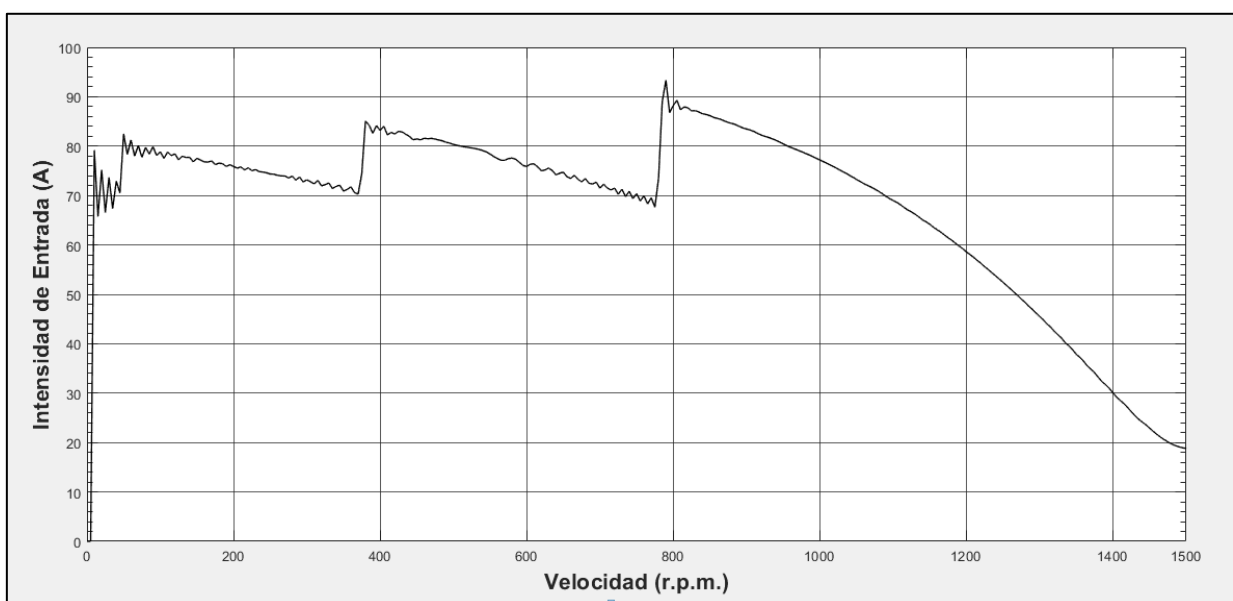


Figura 4.42 Variación de la intensidad mediante sistema de regulación de velocidad por control estático.

También se puede apreciar que la línea de intensidad no es tan nítida como en el caso anterior, se ven oscilaciones. El motivo de estas oscilaciones son las interrupciones que produce en puente de rectificador en el paso de intensidad.

La frecuencia de salida del motor en el rotor, no serán 50 Hz, sino $f_r = s \cdot f$, de manera que conforme el motor aumente de velocidad, el deslizamiento se hace más pequeño y estas oscilaciones desaparecen como se ve en la gráfica.

4.3.1 Par de torsión de la máquina

Mediante la resistencia adicional calculada mediante la Ecuación 4.63, aplicando la Ecuación 2.24, se obtiene el par desarrollado de arranque de la maquina considerando el deslizamiento inicial igual a 1.

$$T = \frac{1}{ws} \cdot \frac{(3 \cdot V_{th}^2) \cdot \left(\frac{R'_2 + (0,524 \cdot Radicional2)}{s} \right)}{\left(R_{th} + \frac{R'_2 + (0,524 \cdot Radicional1)}{s} \right)^2 + j(X_{th} + X'_2)^2}$$

Ecuación 4.69

$$\frac{1}{157,08} \cdot \frac{(3 \cdot 228,42^2) \cdot \left(\frac{0,6258 + (0,524 \cdot 2,62)}{1} \right)}{\left(0,5734 + \frac{0,6258 + (0,524 \cdot 2,62)}{1} \right)^2 + j(0,13862 + 1,71)^2} = 197,25 Nm$$

Como se muestra en la gráfica de la Figura 4.43, se ha conseguido, a partir de las resistencias que el motor pueda tener un arranque con un par resistente de 188 Nm.

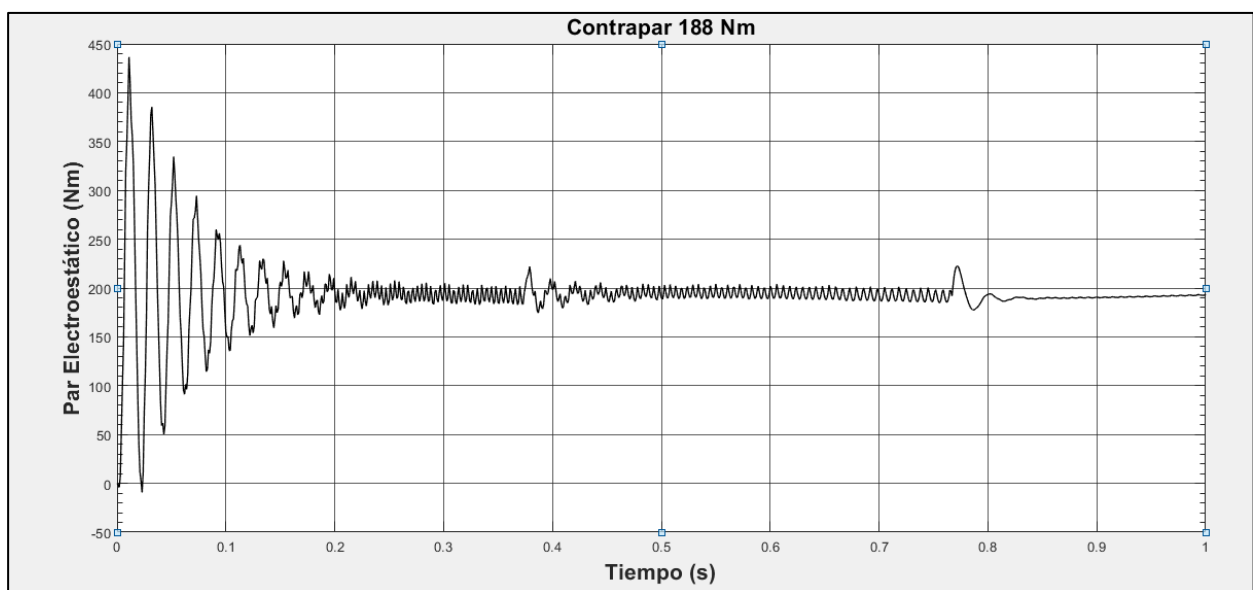


Figura 4.43 Par motor con contrapar 188 Nm

Como se puede apreciar el valor obtenido es ligeramente inferior al calculado, como se ha mencionado en el apartado 4.2.2, el motivo de esta diferencia, se debe principalmente al momento de inercia que posee, el motor en el arranque.

Par calculado = 197,25 Nm ≠ 188 Nm Par Modelo Simulado.

También se observa que en la gráfica de par que la línea no es continua y existen oscilaciones, a partir de la Ecuación 4.60 y de la Ecuación 4.66, despreciando la resistencia del rotor, podemos considerar que el par útil es:

$$T_u = \frac{3I_2'^2 (0,524 \cdot Radicional1)}{\omega r}$$

Ecuación 4.70

Como se ve el par útil está íntimamente relacionado con la potencia disipada en el rotor y la velocidad del rotor, como ya se comentó en el apartado el aumento del deslizamiento la frecuencia se hace inferior y desaparecen estas oscilaciones.

En la gráfica de la Figura 4.44, se aprecia los desplazamientos de par, al variar la resistencia conectada al rotor, para un par resistente de 100 Nm.

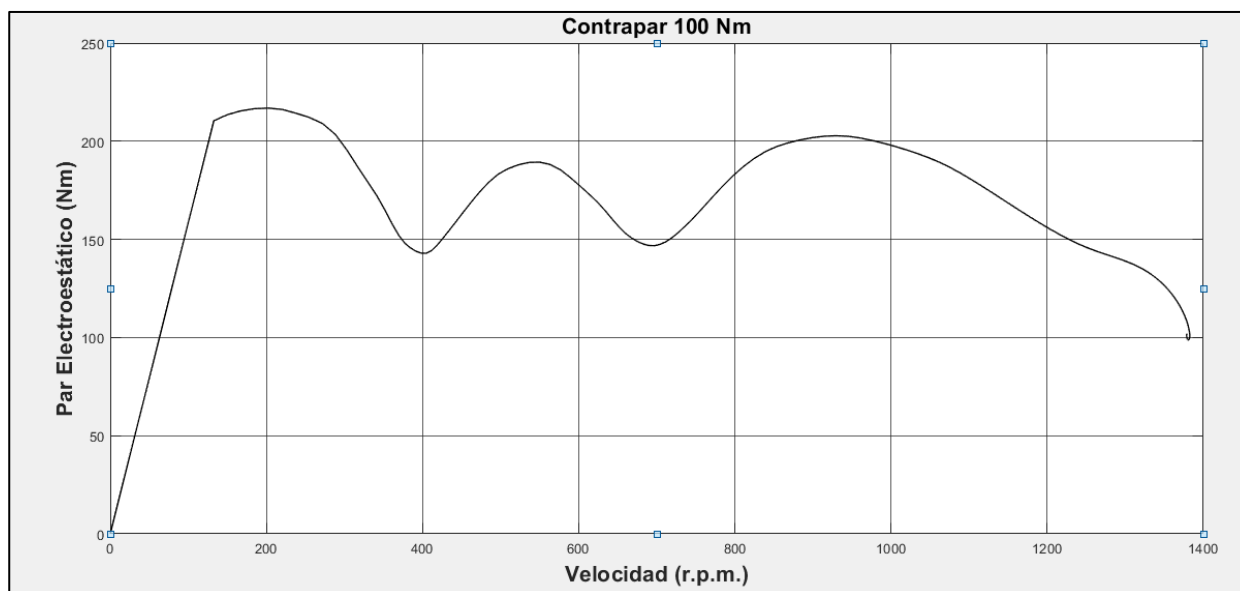


Figura 4.44 Par vs velocidad, con condición de carga 100 Nm.

A partir de la Ecuación 4.69 y la Ecuación 2.8, se ha calculado el deslizamiento y la velocidad para las distintas etapas de regulación de velocidad del motor (Tabla 4.7).

Tabla 4.7 datos de velocidad y deslizamiento calculados.

Datos calculados para Par resistente 100 Nm		
Radicional1 (Ω)	Deslizamiento s	Velocidad (r.p.m.)
2,62	0,261023	1108
1,746	0,197621	1204
0,873	0,137165	1294
0	0,07476	1388

4.3.2 Balance de potencia del sistema

Como en el caso anterior se ha realizado un balance de potencia, para la condición de par resistente de **100 Nm**, a partir de la Ecuación 2.21, se crea la siguiente relación.

$$P_e = P_{cu1} + P_{fe} + P_{cu2} + P_u + Prad2 + P\acute{e}rd Mec$$

Siendo ahora **Prad2**, las pérdidas en la resistencia conectada al rotor:

$$Prad2 = Radicional2 \cdot 1,22 \cdot (I'_2)^2$$

Ecuación 4.71

En cuanto a la potencia mecánica interna a partir de la Ecuación 2.17, se tendrá:

$$P_{mi} = \frac{(3I'^2_2 R'_2 + 1,22 \cdot (I'_2)^2 (Radicional2)(1 - s))}{s}$$

Y por lo tanto la potencia útil será:

$$P_u = P_{mi} - P\acute{e}rd Mec$$

Se ha expuesto en la Tabla 4.8 y en la Tabla 4.9, los resultados obtenidos mediante el simulador y calculados, para poderlos comparar.

Tabla 4.8 Datos calculados para contrapar 100 Nm

Datos calculados, para contrapar 100 Nm											
Etap	Radicional2 (Ω)	I1 (A)	I'2 (A)	Icc (A)	Pcu1 (W)	Pcu2 (W)	PRad1 (W)	Pmi(W)	Perd Mecánicas (W)	Pu (W)	Pe (W)
1	2,62	36,3	27,0	33,13	2363	1372	2876	11967	145	11822	18578
2	1,746	36,0	26,7	32,67	2316	1334	1863	12950	145	12805	18463
3	0,873	35,6	26,3	32,20	2271	1297	905	13754	145	13609	18227
Final	0	34,4	25,0	30,61	2119	1171	0	14493	145	14348	17783

Tabla 4.9 Datos obtenidos del Modelo Simulado para contrapar 100 Nm.

Datos del modelo simulado, para contrapar 100 Nm							
Etap	nr (r.p.m.)	Deslizamiento s	cos φ	Pu (W)	Rendimiento %	Potencia Reactiva (KVar)	Pe (W)
1	1108	0,279	0,7128	11600	63,53	18000	18260
2	1202	0,279	0,7274	12590	69,37	17100	18150
3	1293	0,144	0,7325	13543	74,74	16670	18120
Final	1386	0,076	0,7464	14517	80,65	16050	18000

Como puede observarse al aumentar la resistencia de carga **Radicional2** ↑ , de una manera contenida, se suceden los siguientes acontecimientos:

✓ Disminuye la potencia útil del motor	Pu	↓
✓ Aumenta la potencia disipada en la resistencia de carga	Prad2	↑
✓ Disminuye la velocidad del rotor.	nr	↓
✓ Aumenta el deslizamiento del mismo	s	↑
✓ Disminuye el porcentaje de rendimiento	η%	↓
✓ La potencia eléctrica aumenta	Pe	↑

Finalmente se puede afirmar que la carga reta potencia útil y aumenta levemente el consumo general del sistema y que al mantenerse constante está intensidad y ser la potencia disipada:

$$Prad2 = Radicional2 \cdot 1,22 \cdot (I'_2)^2$$

Es precisamente esta carga "**Radicional2**", la principal responsable de consumir esta potencia y restarla a la potencia útil **Pu**. La energía disipada en la carga es transformada en calor.

En la Tabla 4.10 se puede ver la potencia eléctrica, potencia útil y rendimiento, al regular la velocidad del rotor mediante al sistema de reóstato escalonado y por el sistema de control estático. También se ha indicado la intensidad y par máximo de arranque, con control de velocidad y en sistema directo.

4.3.3 Comparativa entre sistemas de regulación

Se ha realizado una comparativa de datos, para diferentes rangos de velocidad entre el sistema de control de velocidad por reóstato escalonado y el sistema estático, los datos se exponen en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Comparativa de los sistemas de regulación

		Sistema de regulación	Directo	Reóstato Escalonado	Control Estático
Par resistente 100 Nm	Velocidad del motor	Intensidad de arranque (A)	118,5	84,6	79,9
		Par máximo de arranque (Nm)	128	191,85	188
	600 (r.p.m)	Potencia útil (W)	*****	6283	6283
		Potencia eléctrica (W)	*****	18030	18440
		Rendimiento $\eta\%$	*****	34,85	34,07
	800 (r.p.m)	Potencia útil (W)	*****	8377	8377
		Potencia eléctrica (W)	*****	18010	18400
		Rendimiento $\eta\%$	*****	46,51	45,53
	1000 (r.p.m)	Potencia útil (W)	*****	10471	10471
		Potencia eléctrica (W)	*****	18000	18300
		Rendimiento $\eta\%$	*****	58,17	57,22
	1200 (r.p.m)	Potencia útil (W)	*****	12566	12566
		Potencia eléctrica (W)	*****	18000	18130
		Rendimiento $\eta\%$	*****	69,81	69,31
	1386 (r.p.m)	Potencia útil (W)	14517	14517	14517
		Potencia eléctrica (W)	18000	18000	18000
		Rendimiento $\eta\%$	80,65	80,65	80,65

También se ha realizado una comparativa de los datos calculados para el sistema de arranque, entre el sistema de control de velocidad por reóstato escalonado y estático (

Tabla 4.11).

Tabla 4.11 Potencias consumidas en el arranque para el sistema de control por reóstato escalonado y estático.

Control de velocidad por reóstato escalonado						
Etapas	Radical1 (Ω)	Pcu1 (W)	Pcu2 (W)	Prad1 (W)	Pu (W)	Pe (W)
1	3 x 1,310	2093	1149	2406	11834	17627
2	3 x 0,873	2093	1149	1603	12637	17627
3	3 x 0,436	2093	1149	801	13439	17627
Final	0	2119	1171	0	14348	17784
Control de velocidad estático						
Etapas	Radical1 (Ω)	Pcu1 (W)	Pcu2 (W)	Prad2 (W)	Pu (W)	Pe (W)
1	2,620	2363	1372	2876	11822	18578
2	1,746	2316	1334	1863	12805	18463
3	0,873	2271	1297	905	13609	18227
Final	0	2119	1171	0,00	14348	17783

Como se puede observar la Tabla 4.10, la potencia eléctrica consumida **Pe**, en el arranque del motor es superior que en el caso del sistema de control estático. En el sistema de reóstato escalonado, prácticamente se mantiene estable. La razón por la que esta potencia aumenta se debe al puente rectificador, pues cada diodo, conduce 120 ° y son pulsaciones alternas iguales desfasadas 120 ° entre sí. Circulan por el devanado del rotor durante 2/3 del tiempo, dado como resultado que el factor de utilización del generador se eleva al 95 %. Por tanto una carga de 100 kW en continua necesita un generador de **100/0,95= 105 kVA [2]**

Para poder comprobar este efecto se ha realizado una prueba colocando dos cargas de igual magnitud en vatios conectadas al rotor en el sistema de reóstato escalonado y en el sistema de control estático, seguidamente se ha verificado el consumo eléctrico. En la Tabla 4.12, se pueden observar los resultados.

Sistema	Radical (Ω)	Prad (W)	Pe (W)
Reóstato Escalonado	3 x 1,195	1688	17977
Control Estático	2,62	1688	18180

Tabla 4.12. Comparación de consumo de potencia eléctrica.

Como puede observarse la potencia eléctrica ha aumentado de manera significativa y cuanto más grande sea la carga, para regular la velocidad, más grande será la potencia consumida.

4.4 Regulación de velocidad para la recuperación de energía.

Hasta ahora todos los sistemas que se han estudiado en este proyecto, para regular la velocidad y el arranque de los motores han consistido, en disipar energía a partir de unas resistencias, el sistema que a continuación se estudia, recupera la energía producida por el deslizamiento del motor.

Para realizar la recuperación, se dispondrá del siguiente sistema:

Como se ha realizado en el caso anterior, se conectará un puente rectificador de 6 diodos, a las escobillas que conectan con los anillos deslizantes del rotor, el puente de diodos convertirá la corriente alterna en continua y esta alimentará una batería, como se puede observar en la Figura 4.45.

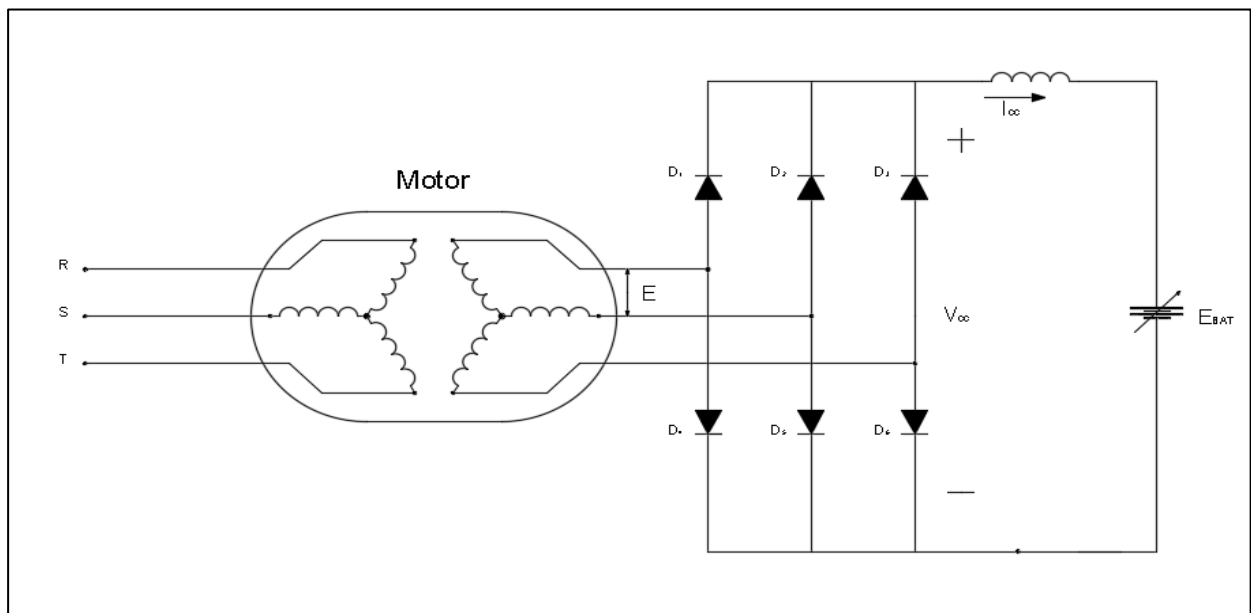


Figura 4.45. Esquema del motor con regulación de velocidad para la recuperación de energía.

Se empleará una batería de parámetros genéricos facilitada por el modelo del simulador, reflejados en la Figura 4.46.

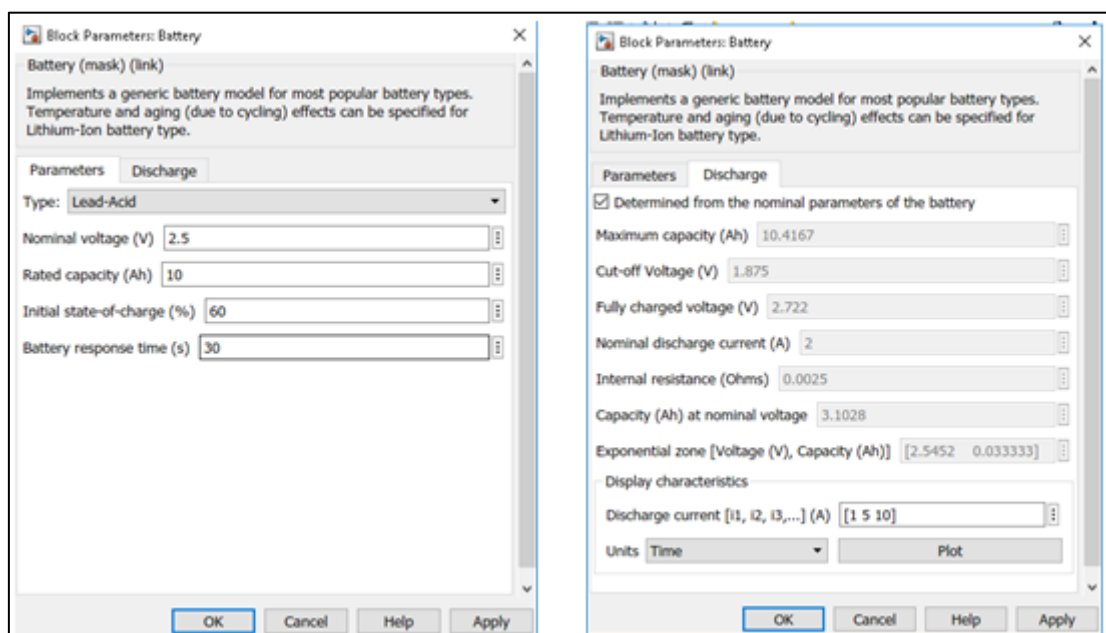


Figura 4.46 Parámetros de la batería.

Las características para régimen de descarga a 1 Ah, 5 Ah y 10 Ah se pueden observar en la Figura 4.47.

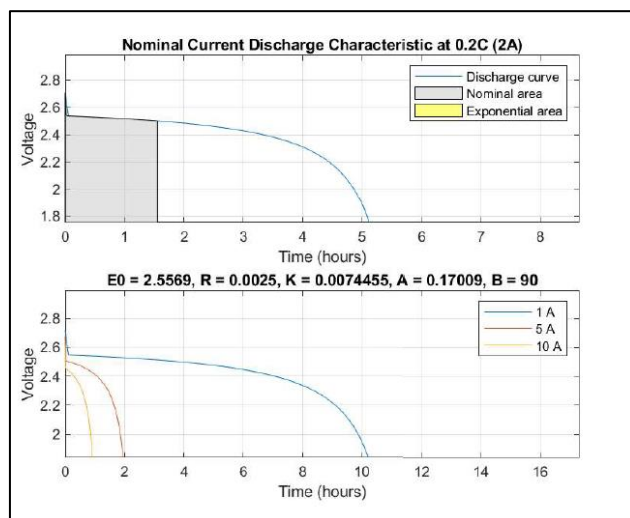


Figura 4.47 Parámetros de la descarga de la batería.

Para analizar matemáticamente el sistema, se enfocará desde dos puntos de vista diferentes. El primero será considerando la batería como un acumulador que incrementa su diferencia de potencia, al cual se denominará **“Variación de Tensión”** y el segundo será considerar la batería como una resistencia variable, que aumenta conforme lo hace la carga de la batería, el cual se denominará **“Variación de Resistencia”**.

Para ello se fijará varios valores de tensión en los bornes de la batería y se estudiarán mediante los cálculos que posteriormente se compararán con los resultados del modelo de simulado.

Una vez comprobado los datos, se realiza la implementación del modelo mediante el simulador.

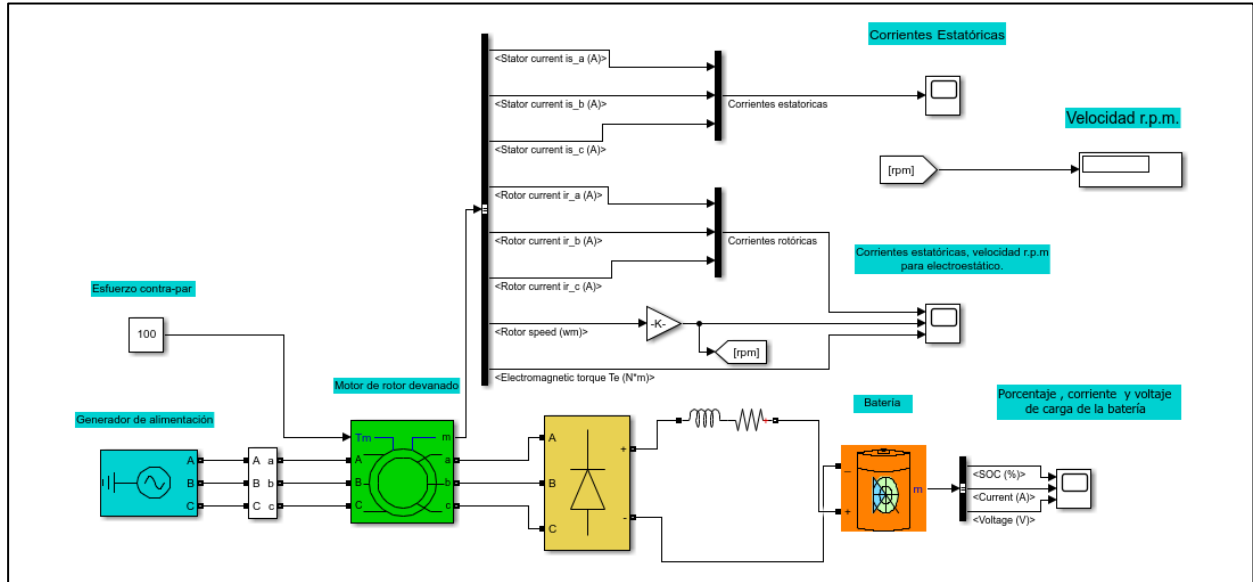


Figura 4.48 Modelo simulado, del sistema de regulación de velocidad para la recuperación de energía.

4.4.1 Comportamiento del motor frente a la batería

Para estudiar el comportamiento del motor frente a la batería, se ha realizado una prueba mediante el simulador, cargando la batería desde un 60 %, hasta el 100 %.

El motor actúa, aumentando muy levemente la intensidad de entrada a la batería y aumentando la tensión de ésta, progresivamente hasta llegar al 100 % de la carga de la batería. La tensión inicial no es cero, se ha fijado un porcentaje inicial de un 60 %

En la siguiente gráfica de la Figura 4.49 se puede observar la intensidad de carga de la batería

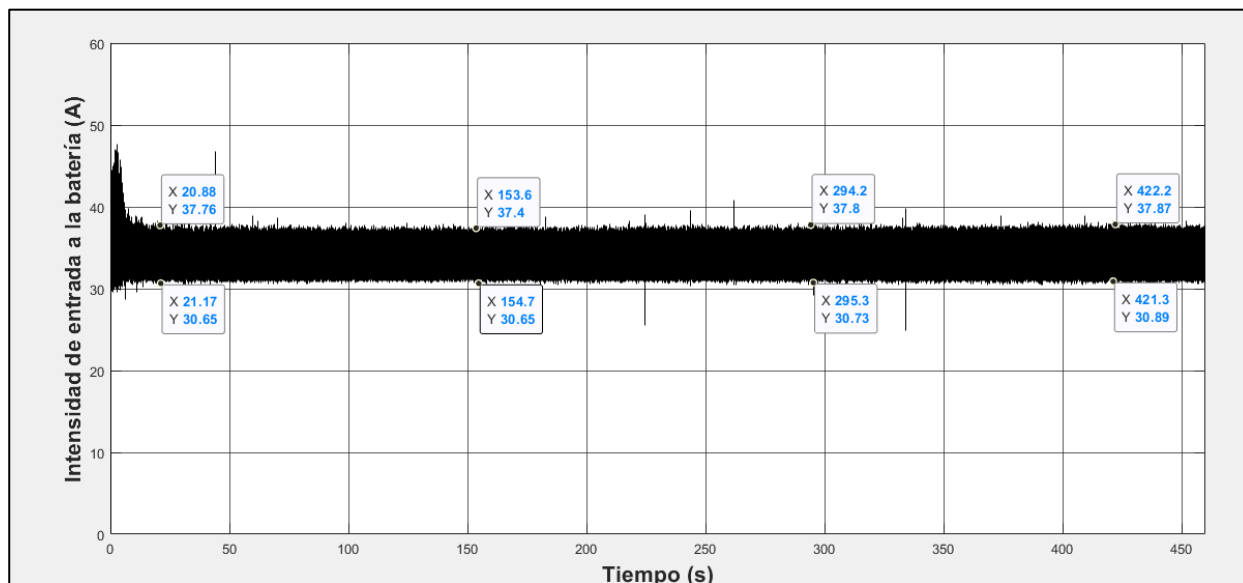


Figura 4.49 Intensidad de entrada a la batería.

Como puede observarse el aumento de intensidad es prácticamente insignificante. En la gráfica de la Figura 4.50 podemos observar la progresión de la tensión en terminales de la batería.

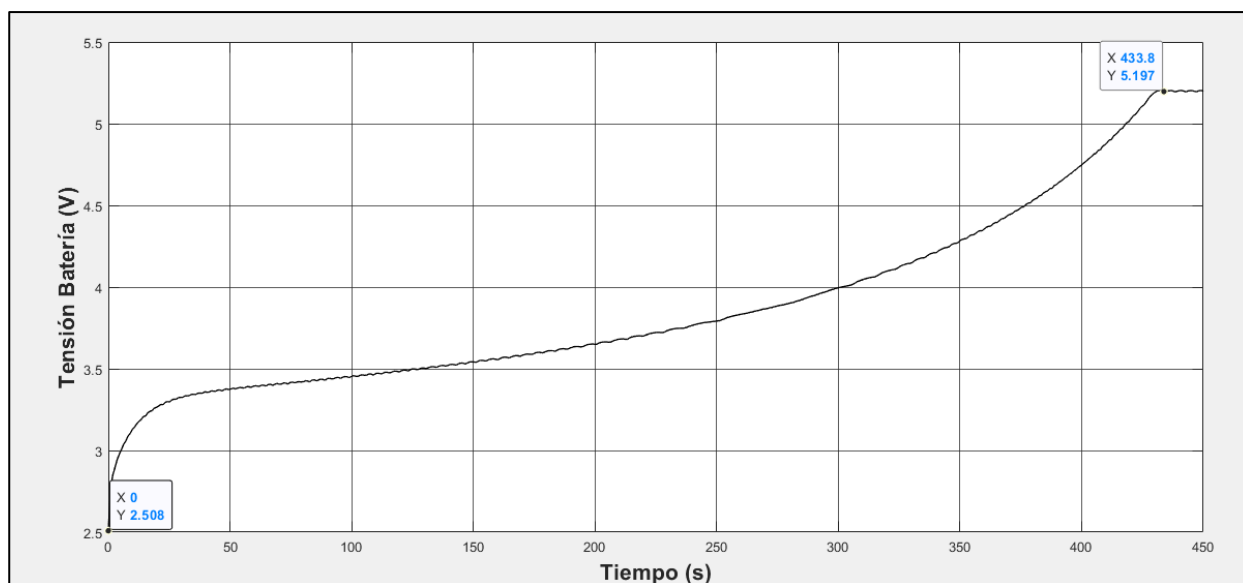


Figura 4.50 Tensión de la batería

Se puede ver, que el valor de la tensión de la batería, se incrementa conforme aumenta el tiempo de carga, valor de tensión inicial es de 2,508 V y el final 5,197 V, donde se mantiene estable.

En la gráfica de la Figura 4.51, se muestra el incremento del porcentaje de carga de la batería pasando del 60 % al 100 %, el tiempo para conseguir este valor es de 423 s, es decir 7 min y 3 s.

En la gráfica de la Figura 4.51, se puede apreciar, como aumenta el porcentaje de carga de la batería a medida que pasa el tiempo, dicho porcentaje de carga, también llamado SOC (State of Charge), varía desde el 60% al 100%.

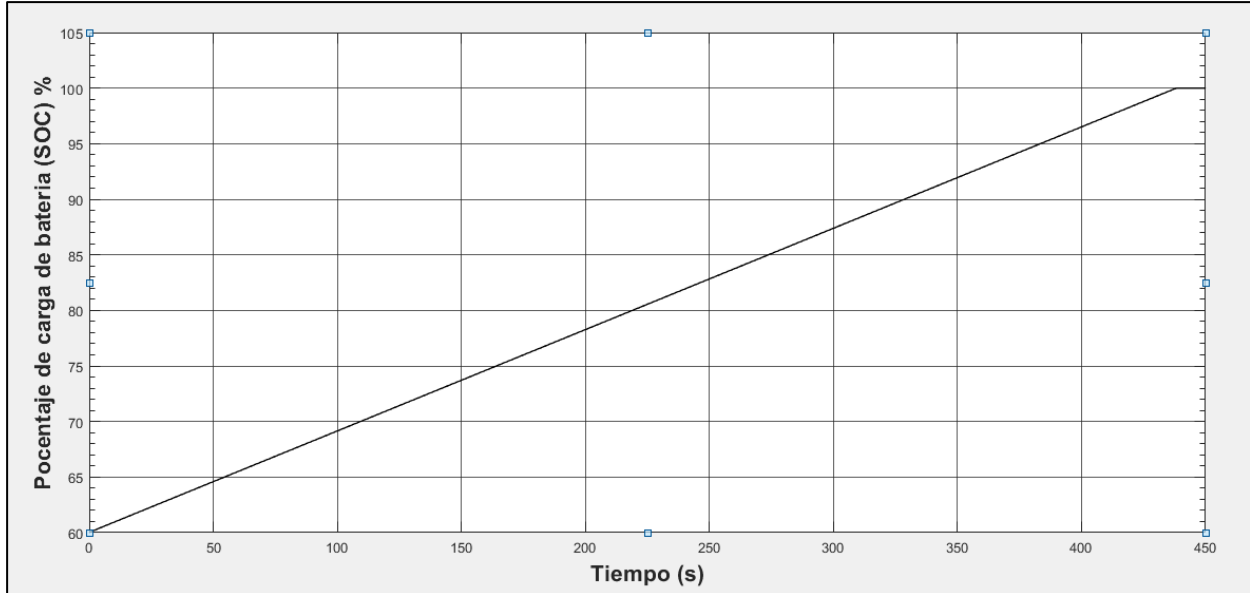


Figura 4.51 Porcentaje de carga de la batería

4.4.2 Análisis de los parámetros, desde el punto de vista de “Variación de Tensión”

Como se puede observar en la gráfica de la Figura 4.50, que conforme aumenta el porcentaje de carga de la batería, aumenta la diferencia de potencial en los bornes de la batería.

En el modelo simulado, de la Figura 4.48, se ha conectado una resistencia y una bobina, en serie con la salida del rectificador de valor prácticamente nulo. Para filtrar las oscilaciones, producidas por el puente rectificador, como la caída RI de la inductancia es despreciable, se puede afirmar que la tensión de salida del puente rectificador es la misma que la tensión de entrada a la batería.

$$V_{cc} = E_{bat},$$

Ecuación 4.72

Al aumentar el porcentaje de carga, de la batería (S.O.C), aumenta la diferencia de potencial en los bornes de la misma, esto supone, que aumenta la tensión inducida en las bobinas del rotor. A partir de la Ecuación 3.2, y se tiene la siguiente relación.

$$V_{cc} = 1,35 E$$

El aumento de tensión se detendrá cuando tanto la tensión de salida del puente rectificador, alimentado por los devanados del rotor y la tensión de la batería se igualen, es decir cuando la batería esté plenamente cargada.

Sin tener en cuenta la caída de tensión que existe en el devanado del rotor, se obtiene que la tensión de salida en los devanados de rotor, es decir en los anillos deslizantes (Ecuación 4.50), será:

$$E = E'_2$$

Siendo entonces E'_2 la tensión reducida del rotor al estator y E_1 el valor eficaz de la *f.e.m* inducida en el estator, estos dos parámetros, están relacionados por la Ecuación 2.10.

$$E'_2 = s \cdot E_2$$

Donde E_2 es la tensión inducida en el rotor en circuito abierto dada por la Ecuación 2.11.

$$E'_2 = E_1$$

Se puede afirmar sin tener en cuenta la caída de tensión en el devanado del rotor que:

$$E_{bat} = 1,35 \cdot E = 1,35 \cdot E'_2 = 1,35 \cdot s \cdot E_2 = 1,35 \cdot E_1$$

$$E_{bat} = 1,35 \cdot E_1$$

Ecuación 4.73

Puede comprobarse que la tensión en bornes de la batería aumentará, al aumentar el deslizamiento.

En la gráfica de la Figura 4.52, se ve como aumenta el deslizamiento en función de la carga.

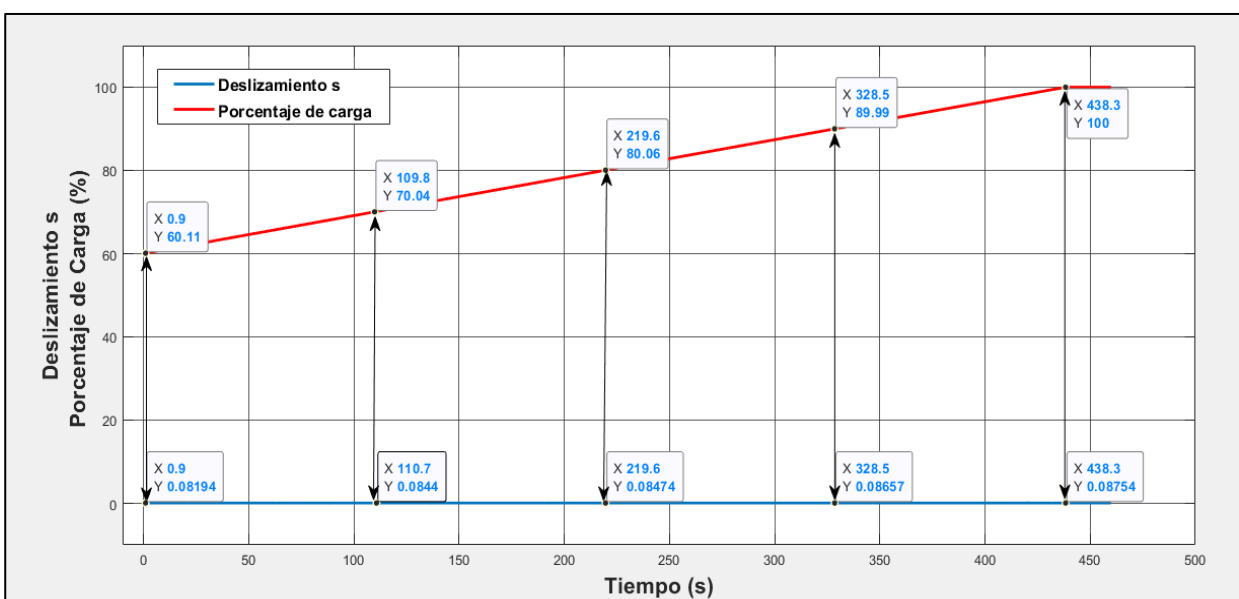


Figura 4.52 Porcentaje de carga vs deslizamiento.

Se puede apreciar en la gráfica de la Figura 4.52 que el deslizamiento aumenta de manera progresiva pasando de un valor inicial de $s = 0,08194$ a un deslizamiento final de $s = 0,08754$.

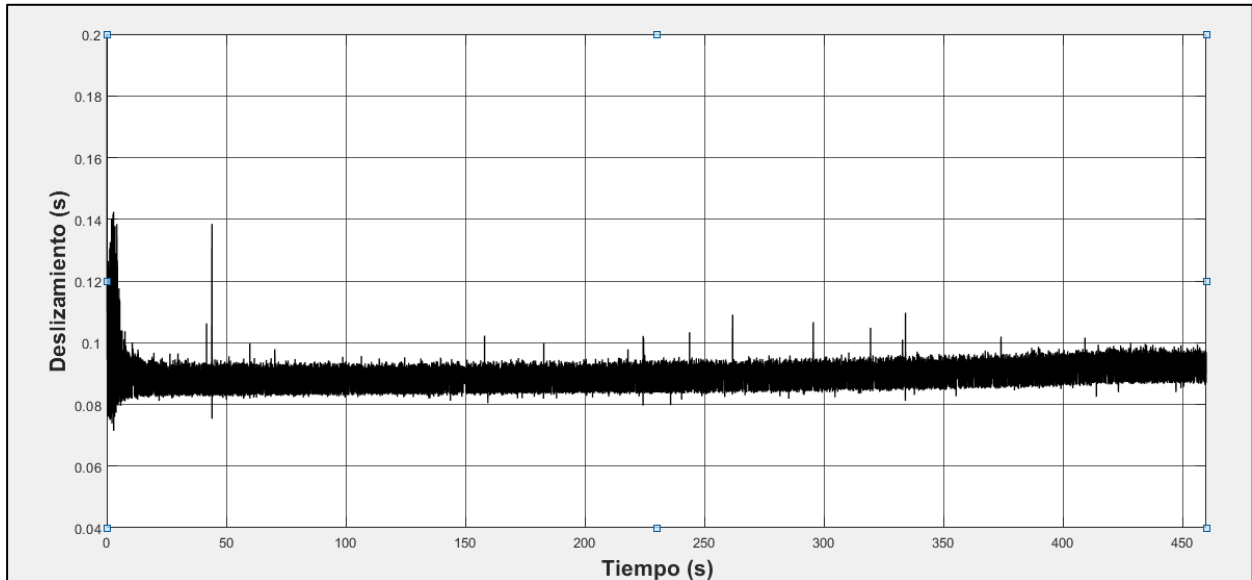


Figura 4.53 Aumento del deslizamiento

Una de las ventajas de este sistema, es que se puede regular la velocidad de un motor mediante el aumento de la tensión en los bornes de la batería, de la Ecuación 4.73, si se despeja el deslizamiento s de la ecuación, como la caída de tensión en la inductancia-resistencia, es despreciable por lo tanto $V_{cc} = E_{BAT}$, por lo tanto se obtiene:

$$s = \frac{E_{BAT}}{1,35 E_2}$$

La ecuación indica que el deslizamiento depende, únicamente de la tensión de la batería E_{BAT} , por lo tanto se podría variar la velocidad del rotor, desde $s=0$ a $s=1$, variando el voltaje de la batería, a partir de la Ecuación 2.8, se obtiene la siguiente relación.

$$\begin{aligned} nr &= (1 - s) \cdot ns \quad (r.p.m) \\ nr &= \left(1 - \frac{E_{BAT}}{1,35 E_2}\right) \cdot ns \end{aligned}$$

Ecuación 4.74

Así, se podría diseñar un sistema de regulación de velocidad a partir mediante la variación del número de celdas a cargar de una batería.

Para poder evaluar los efectos que tiene la conexión de una batería en el sistema se analiza el circuito empleando, las ecuaciones de Kirchhoff, aplicándolo al circuito equivalente de la Figura 4.54

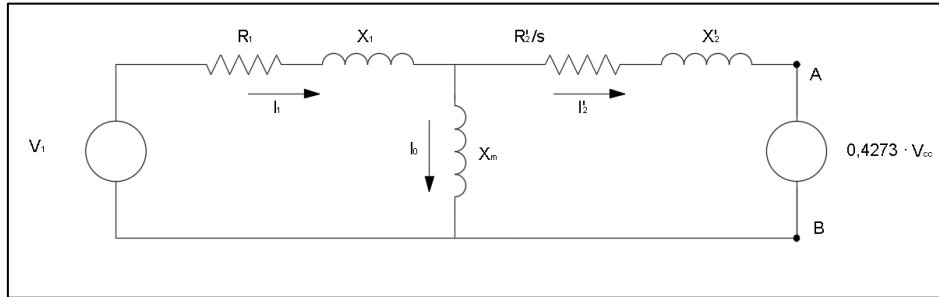


Figura 4.54 Circuito equivalente

Donde la tensión entre los puntos a y b será:

$$V_{CC} = 1,35 V_{AB}$$

Si en los cálculos se utiliza V_{AB} como tensión compuesta de red.

Entonces:

$$V_{AB} = \frac{V_{CC}}{2,34} = 0,4273 V_{CC}$$

$$I_1 = \frac{V_1 + (jX_m \cdot I'_2)}{R_1 + jX_1 + jX_m}$$

Ecuación 4.75

$$I'_2 = \frac{(V_1 \cdot jX_m) - 0,4273 \cdot V_{CC} \cdot (R_1 + jX_1 + jX_m)}{(R_1 + jX_1 + jX_m) \cdot (jX_m + jX_2 + \frac{R'_2}{s}) - (jX_m)^2}$$

Ecuación 4.76

Teniendo en cuenta las ecuaciones de Kirchhoff, al aumentar el deslizamiento, aumenta la intensidad, si puede observar en la Ecuación 4.75 y la Ecuación 4.76.

En la gráfica de la Figura 4.55, se ha dibujado la línea de tendencia que sigue la intensidad conforme la batería se va cargando, se observa que la tendencia es ir incrementando muy levemente.

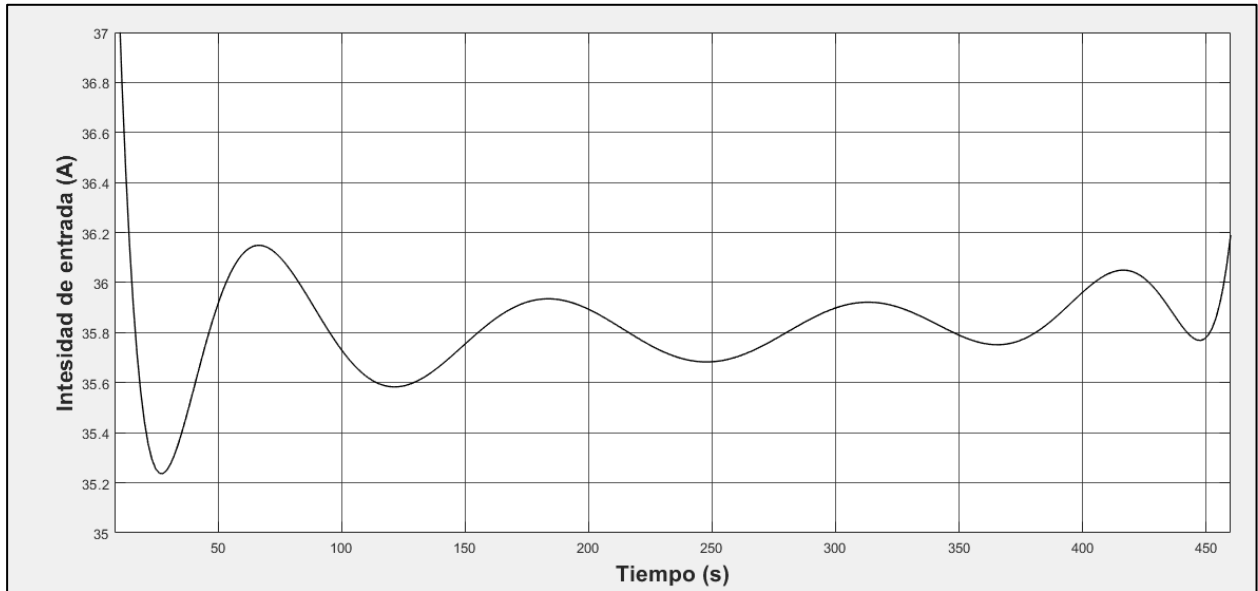


Figura 4.55 Incremento de la intensidad de entrada a la batería

El efecto que se produce en la intensidad se debe a la forma en que actúan las baterías, en ellas, tanto si realiza su carga a tensión constante como a intensidad constante tienden a reducir la intensidad cuando aumentan su carga, como se observa en la Figura 4.56.

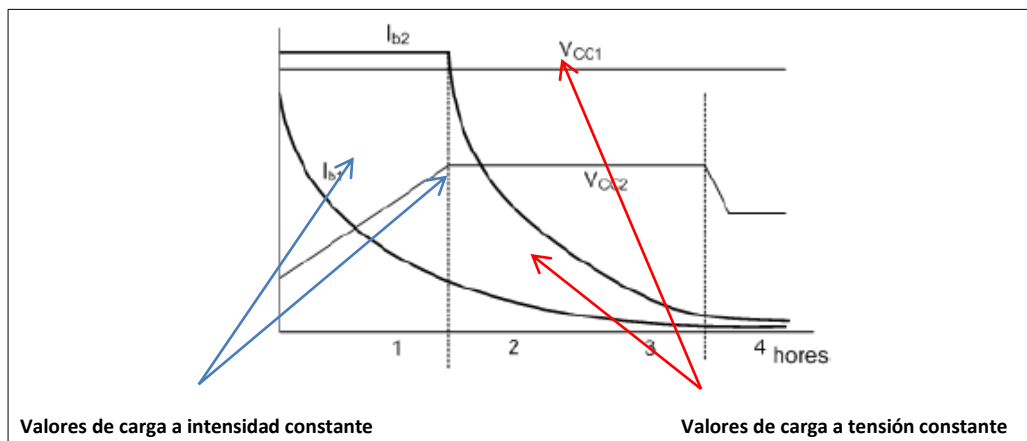


Figura 4.56 Curvas de carga de una batería a tensión constante e intensidad constante.[5]

Se produce un efecto de equilibrio sobre la intensidad, aumenta el deslizamiento, aumenta la intensidad, por la parte del motor y por la parte de la batería, disminuye la intensidad, así que esta queda compensada, aumentando muy levemente.

Si ahora se analiza el par de torsión mediante la Ecuación 2.24:

$$T = \frac{1}{\omega s} \cdot \frac{(3 \cdot V_{th}^2) \cdot (R'_2/s)}{(R_{th} + R'_2/s)^2 + (X_{th} + X'_2)^2}$$

Se puede ver, que en las otras ocasiones para hallar el par de Torsión, al ser una resistencia, únicamente debíamos sumarla a la resistencia del rotor, pero en este caso, se tiene una caída de tensión, que es la tensión de la batería.

Para analizar el sistema, se ha empleado el circuito equivalente de Thévenin de la Figura 4.6, la Ecuación 4.7, para calcular la tensión y la Ecuación 4.8 para la impedancia. De esta forma, se obtiene el circuito equivalente de la Figura 4.57.

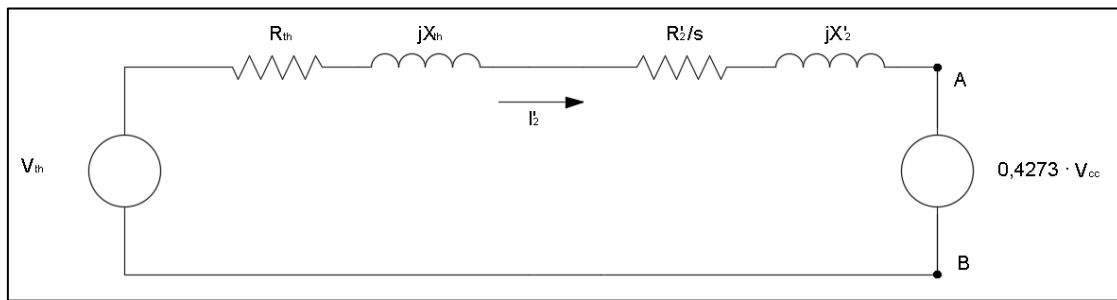


Figura 4.57 Circuito equivalente para sistema de regulación de la velocidad, para la recuperación de energía.

Analizando en circuito por la ley de Ohm se obtiene:

$$V_{th} = Z_{th} \cdot I'_2 + Z_2 \cdot I'_2 + V_{AB}$$

Ecuación 4.77

Entonces:

$$I'_2 = \frac{V_{th} - (0,4273 \cdot V_{cc})}{Z_{th} - Z_2} = \frac{V_{th} - (0,4273 \cdot V_{cc})}{R_{th} + \frac{R'_2}{s} + jX_{th} + jX'_2}$$

Ecuación 4.78

La magnitud de la corriente será:

$$I'_2 = \frac{V_{th} - (0,4273 \cdot V_{cc})}{\sqrt{(R_{th} + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_{th} + X'_2)^2}}$$

Ecuación 4.79

La potencia transferida al rotor, se tiene a partir de la Ecuación 2.23, donde ***P_{bat}***, es la potencia consumida por la batería y es igual a:

$$P_{bat} = V_{cc} \cdot I_{cc}$$

Ecuación 4.80

Así pues la potencia transferida al rotor será:

$$P_T = P_{mi} + P_{cu2} + P_{bat}$$

Siendo la potencia mecánica interna (Ecuación 2.17):

$$P_{mi} = (3 \cdot R'_2 \cdot I'^2_2) \cdot \frac{1-s}{s}$$

$$P_T = (3 \cdot R'_2 \cdot I'^2_2) \cdot \frac{1-s}{s} + 3 \cdot R'_2 \cdot I'^2_2 + V_{cc} \cdot I_{cc}$$

Ecuación 4.81

$$P_T = (3 \cdot R'_2 \cdot I'^2_2) \cdot \frac{1}{s} + V_{cc} \cdot I_{cc}$$

Ecuación 4.82

$$P_T = (3 \cdot R'_2 \cdot I'^2_2) \cdot \frac{1}{s} + V_{cc} \cdot 1,22 \cdot I'_2$$

Ecuación 4.83

Entonces a partir de la Ecuación 2.14:

$$P_T = \omega_s \cdot T$$

$$T = \frac{P_T}{\omega_s}$$

Ecuación 4.84

$$T = \frac{1}{\omega_s} \cdot (3 \cdot R'_2 \cdot I'^2_2) \cdot \frac{1}{s} + (V_{cc} \cdot 1,22 \cdot I'_2)$$

Y a partir de la I'_{2} , calculada mediante la Ecuación 4.78 se obtiene el par de torsión.

$$T = \frac{1}{\omega s} \cdot \left[\frac{3 \cdot (V_{th} - (0,4273 \cdot V_{cc}))^2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{\left(R_{th} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X'_2)^2} + \frac{(V_{th} - (0,4273 \cdot V_{cc})) \cdot 1,22 \cdot V_{cc}}{\sqrt{\left(R_{th} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X'_2)^2}} \right]$$

Ecuación 4.85

También en este caso el par de arranque se verá incrementado, al sumarle a la potencia transferida al rotor la potencia consumida por la batería.

4.4.3 Análisis de los parámetros desde el punto de vista de “Variación de Resistencia”

Se ha observado que la tensión de la batería aumenta **E_{bat}** y la intensidad aumenta de manera leve **I_{cc}** , así se puede afirmar, que aplicando la ley de Ohm, la batería es para el motor una resistencia variable **R_i** , en el proceso de su carga y constante una vez se ha cargado.

$$R_i = \frac{E_{BAT}}{I}$$

La variación de la resistencia será pues:

$$\Delta R_i = \frac{E_{BAT\ FINAL}}{I_{cc\ final}} - \frac{E_{BAT\ INICIAL}}{I_{cc\ inicial}}$$

Ecuación 4.86

Así pues, la resistencia de la batería irá incrementándose conforme la batería llega a su máxima capacidad.

En la gráfica de la Figura 4.58, se puede ver el incremento del valor de la resistencia interna de la batería **R_i** .

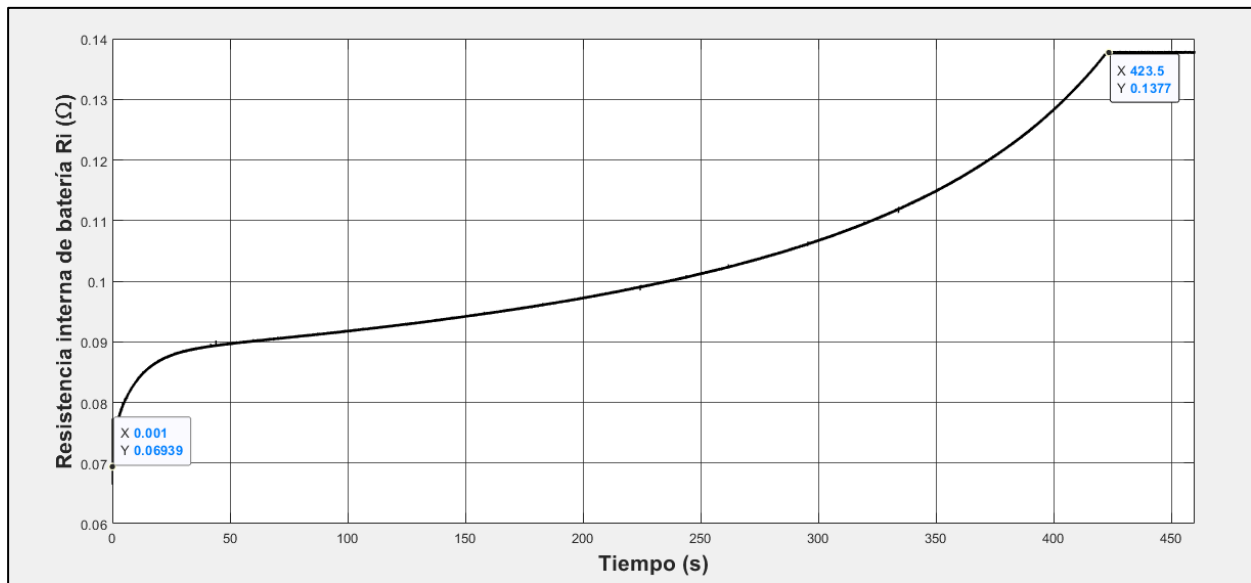


Figura 4.58 Variación de la resistencia interna de la batería

Conociendo a través del modelo simulado, los valores de intensidad de entrada y tensión de la batería, se calcula los valores de resistencia inicial (***Ri inicial***) y resistencia final ***Ri final***, de la batería.

$$E_{BAT\ INICIAL} = 2,508\ V, \quad I_{cc\ INICIAL} = 31,22\ A$$

$$R_{i\ INICIAL} = \frac{E_{BAT\ INICIAL}}{I_{cc\ INICIAL}} = \frac{2,508}{31,22} = 0,08\ \Omega$$

Ecuación 4.87

$$E_{BAT\ FINAL} = 5,197\ V, \quad I_{cc\ FINAL} = 33,98\ A$$

$$R_{i\ FINAL} = \frac{E_{BAT\ FINAL}}{I_{cc\ FINAL}} = \frac{5,197}{33,98} = 0,1529\ \Omega$$

Ecuación 4.88

Se tendrá una variación de resistencia entonces de:

$$\Delta R_i = R_{i\ FINAL} - R_{i\ INICIAL} = 0,1529 - 0,08 = 0,0729\ \Omega$$

Ecuación 4.89

Como se puede observar en la gráfica de la Figura 4.58, el comportamiento de la batería analizándola desde la perspectiva de considerarla una resistencia, no es lineal.

Si ahora se analiza el deslizamiento, se verá, que el motor llegará al régimen de velocidad del rotor y lentamente la batería ira cargándose y aumentado la resistencia interna de la batería ***Ri***, al aumentar la resistencia del rotor, aumentará el deslizamiento, si se aplica la Ecuación 2.26, se tendrá:

$$s_{max} = \frac{R'_2 + R_i}{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2}$$

“El deslizamiento máximo que presenta, máximo es directamente proporcional a la resistencia del rotor, pero el par máximo es independiente del valor de la resistencia del rotor [3].”

La velocidad del rotor al aumentar s , tal y como se vio en la Ecuación 4.74, aumentará.

$$nr = \left(1 - \frac{E_{BAT}}{1,35 \cdot E_2}\right) \cdot ns$$

En cuanto a la intensidad, teniendo en cuenta las ecuaciones de Kirchhoff, al aumentar el deslizamiento, aumenta la intensidad, se puede observar en la Ecuación 4.90 y la Ecuación 4.91

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1 + jX_1 + jX_m - \frac{jX_m^2}{\frac{(R'_2 + (0,524(Ri + \Delta Ri))}{s} + jX'_2}}$$

Ecuación 4.90

$$I'_2 = I_1 \cdot \frac{jX_m}{jX_m + \frac{R'_2 + (0,524(Ri + \Delta Ri))}{s} + jX'_2}$$

Ecuación 4.91

Si ahora revisamos el contrapar que ofrece la batería al considerarla una resistencia, a partir de la Ecuación 4.41, se obtendrá la siguiente expresión:

$$T = \frac{1}{\omega s} \cdot \frac{(3 \cdot V_{th}^2) \cdot \left(\frac{R'_2 + (0,524 \cdot (Ri + \Delta Ri))}{s}\right)}{\left(R_{th} + \frac{R'_2 + (0,524 \cdot (Ri + \Delta Ri))}{s}\right)^2 + (X_{th} + X'_2)^2}$$

Ecuación 4.92

En este capítulo se ha considerado la batería como una resistencia, pero al ser tan pequeña, no modificará de manera significativa el par desarrollado, realizando pruebas con los diferentes porcentajes de carga y la gráfica de la Figura 4.59 donde se analiza el par motor vs velocidad resulta ser la misma. Las prueba se ha realizado en condición de carga nula, contrapar de 0 Nm y no se aprecian efectos al aumentar la resistencia de la batería

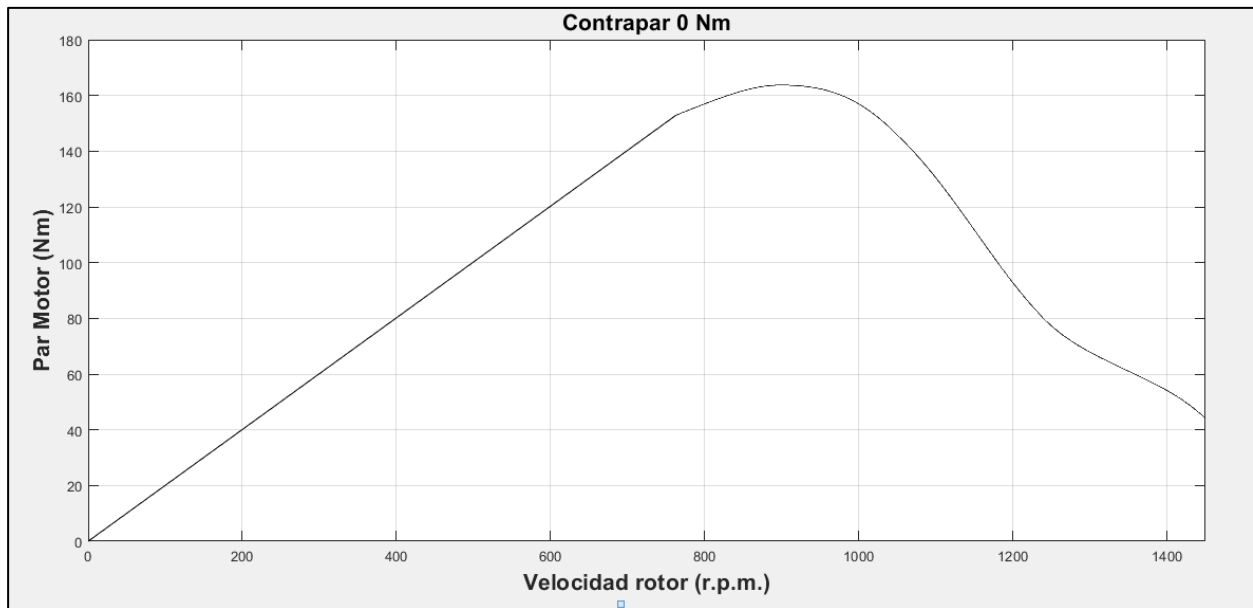


Figura 4.59 Par de motor, para condición de vacío.

En cuanto al par desarrollado en el arranque ($s=1$) se verá que aumentará levemente.

4.4.4 Cálculo de la intensidad de arranque.

Se calculará la intensidad de arranque, desde los dos puntos de vista y se comparará con el obtenido mediante el modelo simulado:

4.4.4.1 Variación de tensión

A partir de la Ecuación 4.75 y la Ecuación 4.76, obtenemos la intensidad de arranque:

$$I_1 = \frac{V_1 + (jX_m \cdot I'_2)}{R_1 + jX_1 + jX_m} = 118,84 \quad / \quad -56,58^\circ \text{ A}$$

Ecuación 4.93

$$I'_2 = \frac{(V_1 \cdot jX_m) - 0,4273 \cdot V_{cc} \cdot (R_1 + jX_1 + jX_m)}{(R_1 + jX_1 + jX_m) \cdot (jX_m + jX_2 + \frac{R'_2}{s}) - (jX_m)^2} = 102,80 \quad / \quad -53,76^\circ \text{ A}$$

Ecuación 4.94

4.4.4.2 Variación de resistencia

A partir de la Ecuación 4.90 y la Ecuación 4.91 , obtenemos la intensidad de arranque:

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1 + jX_1 + jX_m - \frac{jX_m^2}{(R'_2 + (0,524 (Ri + \Delta Ri)) + jX'_2)} = 118,137 / -55,85^\circ \text{ A}$$

Ecuación 4.95

$$I'_2 = I_1 \cdot \frac{jX_m}{jX_m + \frac{R'_2 + (0,524 (Ri + \Delta Ri))}{s} + jX'_2} = 102,5 / -52,88^\circ \text{ A}$$

Ecuación 4.96

4.4.4.3 Modelo simulado

En la gráfica de la Figura 4.60 podemos apreciar la intensidad en el momento del arranque, calculada por el simulador:

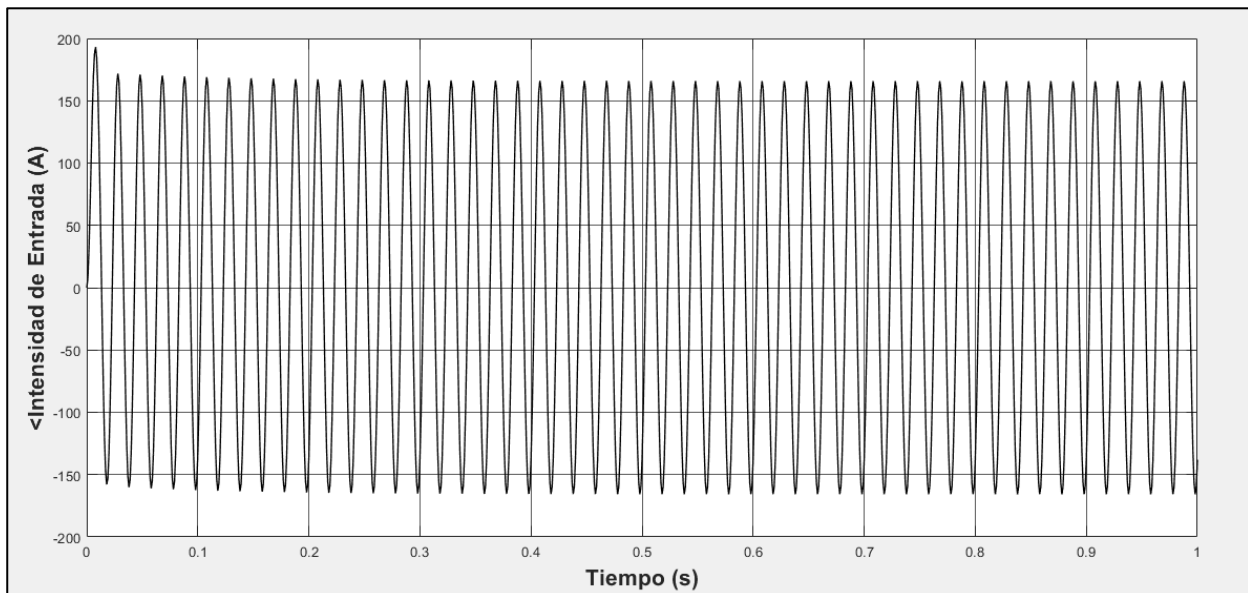


Figura 4.60 Intensidad de arranque en el sistema de control de velocidad, para la recuperación de energía.

En la imagen se aprecia que la intensidad de pico, se sitúa en torno a 164,3 A siendo 116 A la intensidad RMS.

Se compara entonces la intensidad calculada y la obtenida por el simulador:

I de arranque Variación de Voltaje (Calculada) = 118,84 A

I de arranque Variación de Resistencia (Calculada) = 118,137 A

I de arranque (Modelo Simulado) = 116 A

4.4.5 Cálculo del par de arranque.

Se calculará el par de arranque desde los dos puntos de vista y se comparará con el obtenido mediante el modelo simulado:

4.4.5.1 Variación de tensión

A partir de la Ecuación 4.85, y considerando la condición de deslizamiento inicial ($s=1$), obtenemos la intensidad de arranque.

$$T = \frac{1}{157,08} \cdot \left[\frac{3 \cdot (228,42 - (0,4273 \cdot 2,508))^2 \cdot \frac{0,6258}{1}}{\left(0,5734 + \frac{0,6258}{1}\right)^2 + (0,13862 + 1,71)^2} + \frac{(228,42 - (0,4273 \cdot 2,508)) \cdot (1,22 \cdot 2,508)}{\sqrt{\left(0,5734 + \frac{0,6258}{1}\right)^2 + (0,13862 + 1,71)^2}} \right] = 129,24 \text{ Nm}$$

Ecuación 4.97

4.4.5.2 Variación de resistencia

A partir de la Ecuación 4.92, y considerando la condición de deslizamiento inicial ($s=1$), obtenemos la intensidad de arranque.

$$T = \frac{1}{157,08} \cdot \frac{(3 \cdot 228,42^2) \cdot \left(\frac{0,6258 + (0,524 \cdot 0,08)}{1}\right)}{\left(0,5734 + \frac{0,6258 + (0,524 \cdot 0,08)}{1}\right)^2 + (0,13862 + 1,71)^2} = 134,39 \text{ Nm}$$

Ecuación 4.98

4.4.5.3 Modelo simulado

Se ha realizado la prueba mediante el modelo simulado y se ha conseguido que el motor venza un par resistente de 135 Nm, como se puede apreciar en la gráfica de la Figura 4.61.

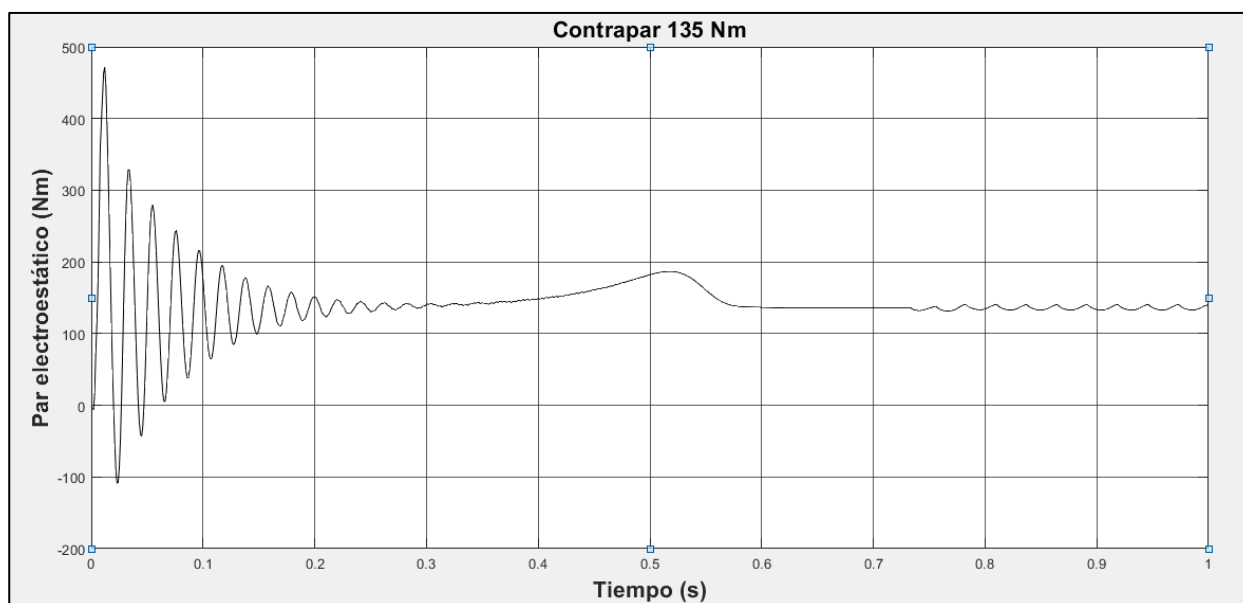


Figura 4.61 Par motor con condición de carga de 135 Nm.

Finalmente se ha desestimado continuar con los cálculos, mediante el sistema de “Variación de la Resistencia”, pues no es posible que el valor de resistencia aumente prácticamente el doble de su valor.

Se compara entonces el par de arranque calculado y el obtenido por el simulador:

Par de arranque Variación de Voltaje (Calculado) = 129,24 Nm.

Par de arranque Variación de Resistencia (Calculado) = 134,39 Nm.

Par de arranque (Modelo Simulado) = 135 Nm.

4.4.6 Balance de potencia del sistema.

Se ha realizado un balance de potencia para la batería de **2,5V**, en fijando unos valores de tensión en la batería, para una condición de carga con par resistente de **100 Nm**,

La variación de porcentaje se ha realizado mediante escalones de 10%, desde 60 %, hasta 100 %.

A partir de la Ecuación 2.21, se obtiene la siguiente relación:

$$P_e = P_{cu1} + P_{fe} + P_{cu2} + P_u + P_{bat} + P_{érd Mec}$$

A partir de la Ecuación 4.75, la Ecuación 4.76, la Ecuación 4.85, la Ecuación 2.8 y la Ecuación 3.3 se han calculado los valores de intensidad de los devanados del motor, la intensidad de la batería, deslizamiento y velocidad del rotor, figuran en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Valores calculados de intensidades, deslizamiento y velocidad.

Datos Fijados	Datos calculados				
Voltaje de batería Ebat (V)	Intensidad de batería (A)	Deslizamientos	Velocidad nr r.p.m.	Intensidad estator I1 (A)	Intensidad rotor I'2 (A)
2,7	30,49	0,07523	1387,16	34,43	24,99
3,5	30,49	0,07536	1386,96	34,44	24,99
4,0	30,49	0,07545	1386,83	34,44	24,99
4,5	30,49	0,07553	1386,70	34,44	24,99
5,0	30,49	0,07562	1386,58	34,45	25,00
5,2	30,50	0,07566	1386,51	34,45	25,00

También se han calculado a partir de estos datos las potencias consumidas, en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Potencias calculadas.

Datos fijados	Datos calculados						
Voltaje de batería Ebat (V)	Pcu1 (W)	Pcu2 (W)	Pmi (W)	Pbat(W)	Perd Mecánicas (W)	Pu (W)	Pe (W)
2,7	2122,20	1172,24	14410,87	82,31	145	14328,56	17787,62
3,5	2123,00	1172,57	14387,33	105,80	145	14281,53	17788,71
4,0	2123,36	1172,64	14370,34	121,96	145	14248,38	17788,31
4,5	2123,84	1172,82	14354,88	137,22	145	14217,66	17788,76
5,0	2124,29	1172,97	14339,28	152,47	145	14186,81	17789,02
5,2	2124,80	1173,31	14334,37	158,60	145	14175,77	17791,08

En la Tabla 4.15 se pueden observar los datos obtenidos mediante el modelo del simulador, se puede comprobar que los resultados, son bastante aproximados a los obtenidos mediante el cálculo

Tabla 4.15 Datos obtenidos del modelo simulado.

Datos obtenidos del modelo simulado							
Voltaje de batería Ebat (V)	Pocentaje de carga %	Intensidad de batería (A)	Deslizamientos	Velocidad nr r.p.m.	Intensidad estator I1 (A)	Intensidad rotor I'2 (A)	Pe (W)
2,7	61	31,24	0,08194	1377,09	34,99	23,4	17990
3,5	73	33,96	0,08440	1373,39	35,1	23,49	18000
4,0	85	33,96	0,08467	1372,05	35,2	24,02	18020
4,5	90	33,97	0,08657	1370,15	35,45	24,44	18040
5,0	96	33,97	0,08754	1368,69	35,5	24,47	18040
5,2	100	33,98	0,08946	1365,70	35,6	24,50	18050

En la gráfica de la Figura 4.62 se puede ver que al aumentar carga de la batería aumenta la tensión en sus bornes y por lo tanto aumenta la potencia disipada en ella.

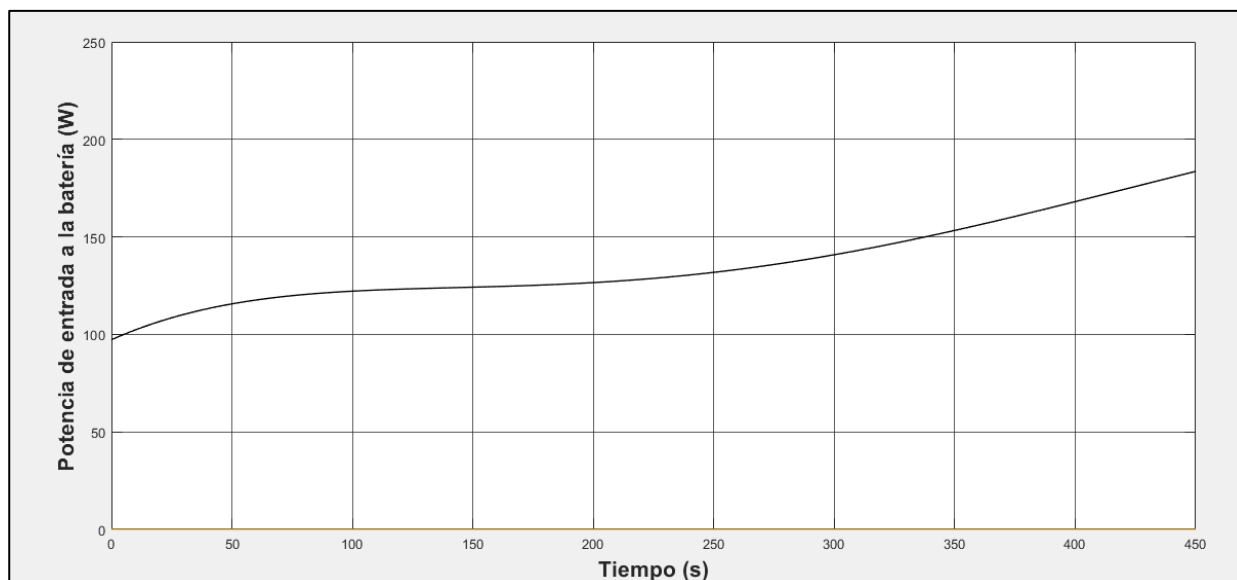


Figura 4.62 Evolución de la potencia de entrada en la batería

En la gráfica de la Figura 4.63 se puede observar, la potencia de entrada, al sistema, se puede ver que la línea no es muy nítida, pues el puente convertidor, interrumpe la señal de intensidad y esto la distorsiona.

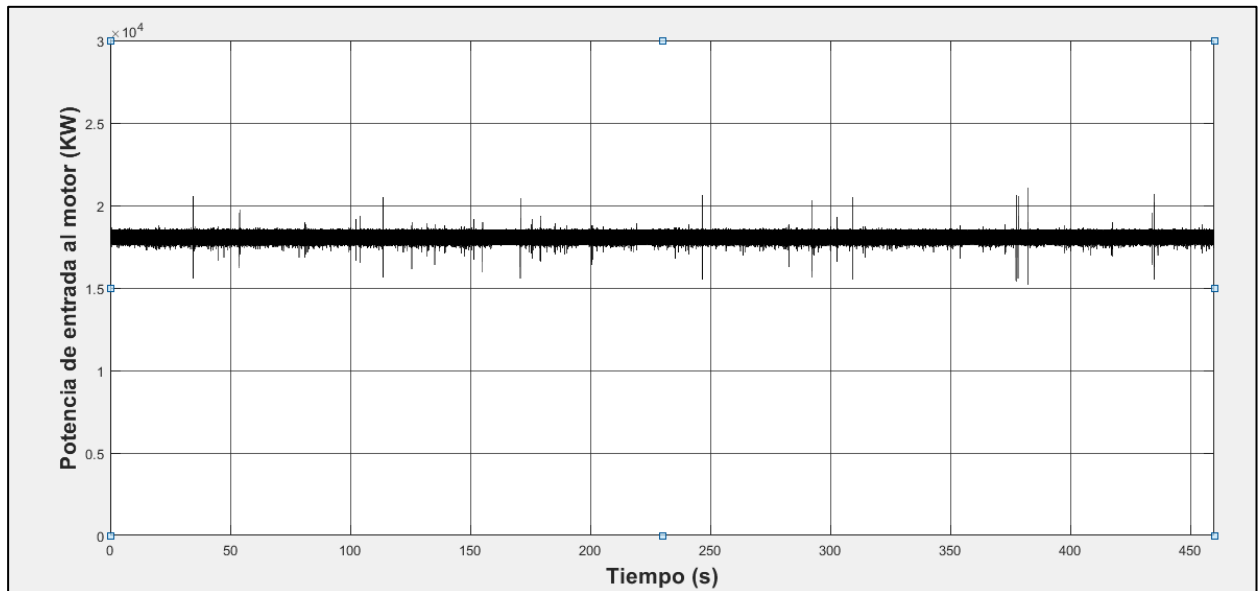


Figura 4.63 Potencia de entrada al motor, en condición de carga de 100 Nm.

5 Estudio económico

La elaboración del estudio económico se ha realizado, desde el punto de vista de los costes en recursos humanos y las tareas efectuadas para llevar a cabo la implementación de uno de los sistemas de regulación de este proyecto y que engloban los costes de ingeniería en I+D y de montaje.

También se realizado un estudio económico de los materiales empleados para construir el sistema de regulación de velocidad, por control estático. El coste del motor se ha estimado.

Estudio económico en recursos humanos					
Departamento	Concepto	Categoría del personal	Precio por hora (€/h)	Tiempo empleado (h)	Coste (€)
Ingeniería e I+D	Investigación	Técnico	40	340	13600
Ingeniería e I+D	Diseño	Técnico	40	340	13600
Ingeniería e I+D	Elaboración de la memoria	Técnico	40	100	4000
				Subtotal	31200
Administración	Elaboración de la oferta	Administrativo	20	24	480
				Subtotal	480
Soldadura	Realización de la bancada, soporte del motor estándar	Oficial 1ª Soldador	20	16	320
		Ayudante Soldador	15	16	240
				Subtotal	560
Mecánica	Colocación del motor en la bancada y alineación del mismo, mediante comparador laser.	Oficial 1ª Mecánico	20	3	60
		Ayudante Mecánico	15	3	45
		Ayudante Mecánico	15	3	45
				Subtotal	45
Electricidad	Montaje del armario eléctrico	Oficial 1º Especialista en cuadros	25	8	33
	Anclado del armario y conexionado de todos los elementos	Oficial 1ª Eléctrico	20	8	160
		Ayudante Eléctrico	15	8	120
				Subtotal	313
	Verificación y pruebas	Técnico	40	2	80
F.N.B UPC S.L.				Subtotal	80
				Total	32678
				Total + I.V.A	39540,4

Estudio económico en coste de materiales Sistema para la regulación de velocidad por control estático						
Concepto	Emplazamiento	Precio por und (€)	Unidad de medida	Cantidad necesaria	Unidad de medida	Coste (€)
Material para la construcción de estructuras						
Perfil UPN 100, Norma UNE 36522:2018	Bancada	10,6	kg / m	6	m	63,6
Tornillo M-18, 50 mm longitud, calidad 12	Bancada	1,16781	und	4	und	4,7
Material eléctrico						
Motor de rotor devanado con anillos deslizantes, trifásico, 400 VAC, 18 kW, 50 Hz	Bancada	3800	und	1	und	3800
Armario eléctrico en acero laminado con puerta única, IP65, medidas 1650x600x400 Marca IDE , referencia BIG1656040PO.	Armario eléctrico	949,63	und	1	und	949,63
Interruptor general de corte omnipolar del armario. Interruptor de levass de 3 polos 63 A, marca Gave referencia A-5526100	Armario eléctrico	93	und	1	und	93
Contactor 3 polos, 22 kW AC3, General Eléctric Ref EF50A300B400	Armario eléctrico	210,25	und	1	und	210,3
Relé térmico de tres polos regulable de 20-25 , General Eléctric RefAGPF1L45CT1	Armario eléctrico	16,96	und	1	und	17,0
Relé de control de secuencia, fallo de fase y variación voltaje, Gave, referencia RF02-400	Armario eléctrico	132,43	und	1	und	132,4
Ventilador con filtro, IDE, Referencia VF280AC, refrigeración armario eléctrico	Armario eléctrico	81,15	und	2	und	162,3
Resistencia variable, 962 W. RE/60X370 SAC/ES OR873 10% Ecoemsa.	Armario eléctrico	86	und	3	und	258
Contactor 3 polos, 3kW AC3, Ref LCD12U7 Schneider.	Armario eléctrico	17,21	und	3	und	51,63
1 puente rectificador SQL100 Amperios 1600V Rectificador Trifásico de Alta Potencia de Puente de Diodo de Onda Completa 5 Terminales	Armario eléctrico	11,39	und	1	und	11,39
F.N.B UPC S.L.				Total + I.V.A.		5753,95

6 Conclusiones

Los motores de anillos deslizantes son una herramienta increíble, estos alimentan grandes máquinas y resuelven problemas donde no existen más alternativas, la posibilidad de conectar cargas en sus anillos colectores permite controlar su velocidad y mover cargas de alta inercia.

La inserción de cargas conectadas al devanado del rotor, bien sean resistencias o baterías, limitan la intensidad de arranque del motor. Con esta energía consumida, se consigue un desplazamiento de las curvas de par, que permiten mantener el par máximo de la máquina desde el inicio de su funcionamiento, hasta alcanzar el régimen deseado

La regulación de la velocidad del motor, se logra mediante el consumo de energía, bien sea mediante la disipación de esta en forma de calor, como es el caso del sistema de regulación por reóstato escalonado y el sistema estático o bien aprovechándola, como en el sistema de recuperación de energía, para cargar una batería. Se puede conseguir el régimen de velocidad que se desee aumentando o disminuyendo la carga.

El aumento de carga conectada a los anillos del rotor, tiene como efecto:

Disminución de:

- ✓ Velocidad del rotor
- ✓ Potencia Útil.
- ✓ Factor de potencia.
- ✓ Rendimiento del motor

Aumento de:

- ✓ Fuerza electromotriz inducida (*f.e.m*) en el rotor.
- ✓ Par de arranque.
- ✓ Intensidad consumida.
- ✓ Deslizamiento.
- ✓ Potencia eléctrica consumida.
- ✓ Frecuencia en el rotor

La intercalación de un puente rectificador, entre el motor y las resistencias, tiene como consecuencia, un pequeño incremento de la potencia consumida.

El par de arranque es ligeramente superior en el sistema de reóstato escalonado, que en el sistema estático.

El sistema de reóstato escalonado, es un mejor sistema que el de control estático, pues consume menos energía a la hora regular la velocidad y se obtienen mejores valores de par de arranque con altos valores de contrapar.

La ventaja del sistema de regulación de velocidad para la recuperación de energía, es que como su nombre indica, recupera la energía mediante una batería la energía que en los modelos anteriores es disipada en forma de calor para el control de la velocidad y el par.

El rendimiento del motor disminuye cuando la velocidad del motor se lleva a valores bajos, esto se debe en primer lugar a la resistencia elevada inicial del rotor y segundo, que al introducir una carga en el rotor, se reduce de una manera drástica la eficiencia motor.

A pesar de emplear dos sistemas de cálculo distintos, en el caso de los modelos simulados y las ecuaciones de este proyecto, se puede comprobar que los resultados son muy parecidos.

He de decir que la experiencia con la herramienta de *software* de modelizado y simulación de sistemas (MATLAB®/Simulink®), ha sido grata, pues permite realizar todas las pruebas necesarias y ensayar cualquier circuito que se desee aplicar. Se puede considerar que herramientas como esta, resultan esenciales en el trabajo de ingeniería actual.

Finalmente se puede afirmar que los objetivos de este proyecto se han cubierto de una manera satisfactoria.

7 Bibliografía

- [1] Máquinas Eléctricas. Jesús Fraile Mora, McGRAW-HILL. 5ª Edición, 2003.
- [2] Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia. Theodore Wildi, PEARSON EDUCACIÓN, 6ª Edición 2007.
- [3] Máquinas Eléctricas. Stephen J. Chapman, McGRAW-HILL. 5ª Edición, 2012.
- [4] Apuntes asignatura “Planta Eléctrica”, Profesor Pau Casals i Torrens. UPC. 2017
- [5] Electrónica Naval, Lluís Closas Torrente i Pau Closas Gómez, 2ª Edición, 2013.

8 Webgrafía

- [1]. <http://www.vymasa.com/es/> 01/10/19
- [2]. <https://www.xinhaimining.com/> 18/09/19
- [3]. https://www.weg.net/catalog/weg/ES/es/Motores-El%C3%A9ctricos/c/EU_MT 18/10/19
- [4]. <http://es.pfernandezdiez.es/index.php?pageID=16> 03/10/19
- [5]. http://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/3391/mod_folder/content/0/Rectificadores_NO_controlados.pdf?forcedownload=1 26/10/19
- [6]. https://www.ucursos.cl/ingenieria/2009/2/EL42C/1/material_docente/bajar?id_material=247064 21/08/19
- [7]. <https://es.mathworks.com/discovery/dynamic-systems.html> 28/02/19
- [8]. http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-sandoval_rm/pdfAmont/cf-sandoval_rm.pdf 15/04/19
- [9]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8342802/> 16/04/19
- [10]. <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2015.1658> 16/04/19
- [11]. <https://zenodo.org/record/1131653> 16/04/19
- [12]. <http://www.obeki.com/productos/rotor-bobinado.html> 23/09/19
- [13]. <https://www.gave.com/> 16/09/19
- [14]. <https://www.schneider-electric.es/es/work/support/downloads/general-rates-schneider-electric-new.jsp> 16/09/19
- [15]. <http://www.fontgas.com/wordpress/wp-content/uploads/2019/02/General-Electric-Tarifa-2018-Fontgas.pdf> 16/09/19
- [16]. <https://www.amazon.com/Walfront/s?k=Walfront> 16/09/19
- [17]. <https://ecomsa.com/> 16/09/19
- [18]. <https://ide.es/esp> 17/09/19
- [19]. <http://www.eurohubner.com/es/tacodinamos--tacometro--taquimetrica> 03/09/19
- [20]. https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/controladores_modulares/logo/pages/default.aspx 03/09/19
- [21]. <https://sija.es/catalogos/tornilleria/SIJA-tarifa-tornilleria-2016.pdf> 16/09/19
- [22]. <http://www.carlosherrera.cl/productos/viga-upn-100/> 16/09/19

9 Anexo 1

En este anexo, se ha creído oportuno hacer una descripción, de la forma en que se realizaría, el montaje físico, del sistema de regulación de la velocidad mediante control estático.

En un primer momento se tomará nota, de la ubicación de motor, para ello se emplearán lo planos de la Figura A. 3.

Se tendrá en cuenta, la localización del motor, para en un futuro poder realizar las tareas de mantenimiento, como pueden ser:

- ✓ Comprobación y sustitución de escobillas.
- ✓ Reapretado de bornes.
- ✓ Medición de tensión y consumo del motor.
- ✓ Medición de los parámetros de aislamiento.
- ✓ Medición de ruidos y vibraciones.

Mediante el equipo formado por soldadores- mecánicos, se construirá una bancada de soporte para el motor. Para ello se empleará el perfil UPN100 de la Figura A. 1.

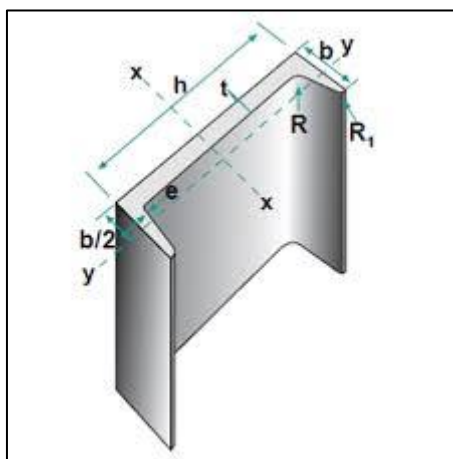


Figura A. 1 Perfil UPN100, Norma UNE 36522:2018

La bancada será fijada sólidamente, a la superficie donde repose. Se realizarán taladros, en el ala del perfil, que serán posteriormente roscados.



Figura A. 2 Tornillos de M-18, 50 mm longitud, calidad 12.[21]

A partir de los tornillos de la Figura A. 2 se fijará sólidamente el motor de Figura A. 3, a la bancada.

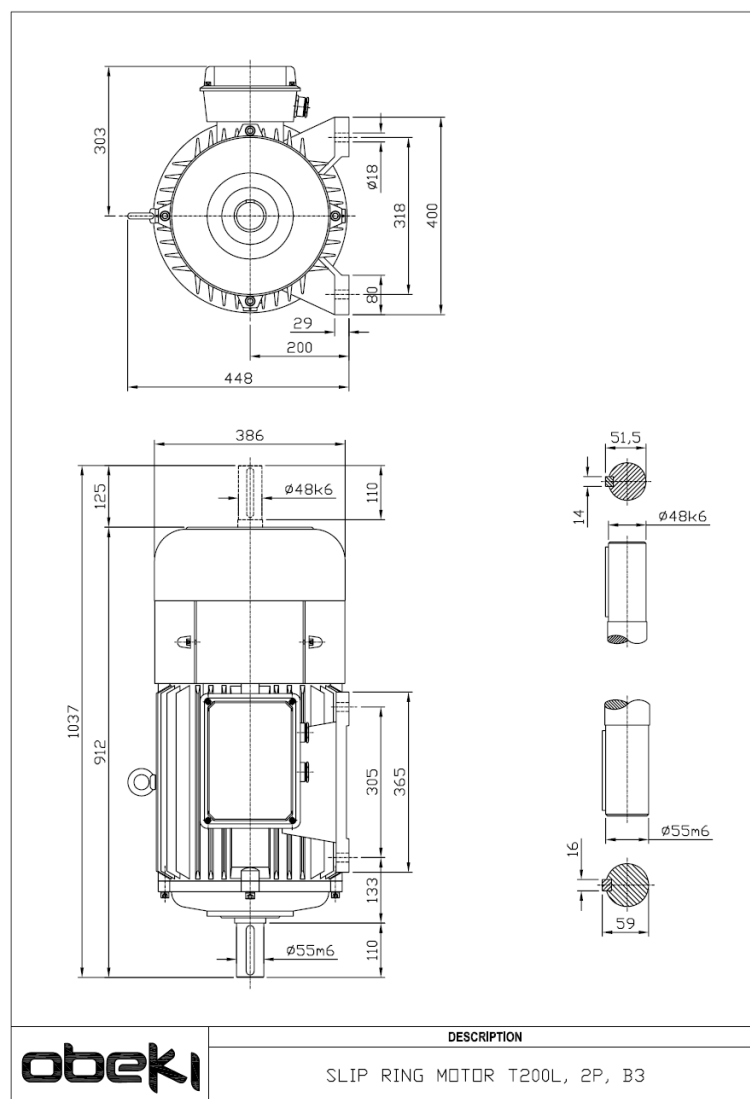


Figura A. 3 Plano de motor de 18,5 kW 400 V, 50 Hz, 4 polos[12]

Para poder controlar la velocidad del rotor del motor, se fijará la dinamo tacométrica de la Figura A. 4, en la parte trasera del motor y anclada mecánicamente al eje del rotor, mediante un acoplamiento.



Figura A. 4 Dinamo tacométrica para control de velocidad del motor.[19]


A partir del equipo eléctrico, se realizará el conexionado en el armario eléctrico, de la Figura A. 5, donde se ubicará un carril repleto de bornes de conexión. El armario goza del grado de protección adecuado (IP 65), para el emplazamiento donde será ubicado.



Figura A. 5 Armario eléctrico de acero, IP 65 1650x600x400, Marca IDE [18]

El suministro eléctrico, aguas arriba, estará protegido contra sobrecargas y cortocircuitos, mediante un interruptor magnetotérmico y contra contactos indirectos mediante un dispositivo de corriente diferencial residual, ambos se ubicarán fuera de este armario, por cuestiones de seguridad.

Una vez llegue el suministro eléctrico, al armario se conectará al interruptor cabecera, que garantiza el corte en carga, en una sola manobra. Será de levas y de corte omnipolar como el de la Figura A. 6,








				A-5520000	A-5521000	A-5522000	A-5522100	A-5523100	A-5524100	A-5526100	A-5527100	A-5529100
 3 polos	2	552		30,52	35,79	42,84	47,43	52,02	64,28	93,00	178,35	219,84
 4 polos	2	553		35,72	40,34	48,37	60,20	64,96	80,47	108,39	205,43	257,57
 5 polos	3	555		45,94	53,28	63,57	80,16	84,58	105,07	136,31	275,81	-
 6 polos	3	556		51,14	59,84	75,17	94,19	99,13	123,00	153,92	321,21	-
 7 polos	4	557		-	-	-	-	-	-	-	-	-

Figura A. 6 Interruptor general de corte omnipolar, con capacidad de corte en carga.[13]

Desde la salida del interruptor, se llevará el suministro, hasta el contactor general, de la Figura A. 7 desde el cual se podrán realizar de manera automática, las maniobras de conexión y desconexión del motor.



Figura A. 7 Contactor 3 polos, 22 kW, AC3, General Eléctric [15].

El motor estará protegido contra sobre-intensidades, mediante la seguridad de un relé térmico como el de la Figura A. 8, que garantiza un control exacto, de la intensidad que recibe el motor.



Figura A. 8 Relé térmico de tres polos regulable de 20-25 A, General Eléctric [15].

Además, para evitar daños en el motor en caso del fallo de suministro eléctrico se instalará un relé de la Figura A. 9, que garantizará el corte del suministro actuando en el contactor general de la Figura A. 7.

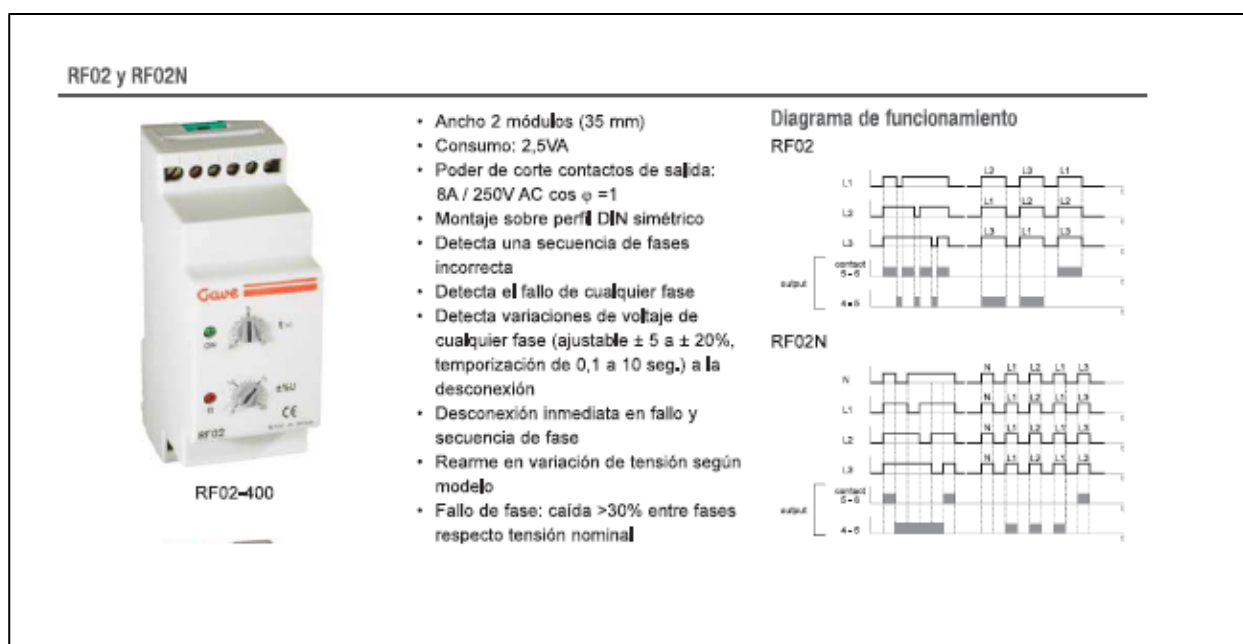


Figura A. 9 Relé de protección en caso de fallo de fase.[13]

Desde la salida del relé térmico y saliendo de las bornes de conexión del armario se llevará el suministro hasta el estator del motor y nuevamente, pero esta vez saliendo desde las escobillas, que conectan con el rotor del mismo, se conectará con el armario eléctrico.

Dentro del armario se ubicará el puente rectificador de 6 diodos como el de la Figura A. 10, donde como se puede observar, por el lado inferior de la figura se conectarán los tres conductores que provienen de las escobillas.



Figura A. 10 Puente rectificador de la diodos de alta potencia [16].

Desde la salida en la parte superior del rectificador de 6 diodos, se llevarán dos conductores, que conectarán en serie, tres resistencias como la de la Figura A. 11, dispuestas también en el interior del armario.



Figura A. 11 Resistencia tubular bobinada 962 W [17].

Y en paralelo con las resistencias se ubicará en cada una de ellas, un contactor como el de la Figura A. 12, que tendrá el poder de cortocircuitarlas generando así las diferentes etapas de velocidad del motor. Al ser estos contactores de 3 polos se aprovechará el resto de contactos para facilitar las maniobras eléctricas.


 2 LC1 D09●●	Contactores de 3 polos									
	Potencias normalizadas de los motores trifásicos de 50-60 Hz en la categoría AC-3 ($\theta \leq 60^\circ\text{C}$)							Intensidad de empleo en AC-3 440 V hasta	Contactos auxiliares instantáneos	Ref. Fijación ⁽¹⁾
	220 V	380 V	415 V	440 V	500 V	660 V	1000 V			
	230 V	400 V				690 V				
	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	A		
Conexión mediante bornas tornillo										
	2,2	4	4	4	5,5	5,5	—	9	1	1
	3	5,5	5,5	5,5	7,5	7,5	—	12	1	1
	4	7,5	9	9	10	10	—	18	1	1
										Ref. Fijación ⁽¹⁾
										LC1D09●●
										LC1D12●●
										LC1D18●●

Figura A. 12 Contactor 3 polos 3 kW, AC3, Schneider [14]

Todo el sistema estará controlado mediante un relé programable, como el de la Figura A. 13, donde se conectará en sus entradas analógicas, los conductores provenientes de la dinamo tacométrica de la Figura A. 4 y controlando así su velocidad. Mediante las salidas de relé de este dispositivo se controlarán las diferentes etapas de velocidad. Este dispositivo también se ubicará dentro del armario



Figura A. 13 Relé programable Logo de Siemens.[21]

Como se prevé una alta temperatura dentro del armario eléctrico, por la disipación de calor de las resistencias, se ha estimado oportuno, colocar en los laterales del armario eléctrico, dos ventiladores-extractores como el de la Figura A. 14, que garantizará una correcta ventilación del armario mediante la instalación de un termostato.



Figura A. 14 Ventilador con filtro, IDE, refrigeración de armario.[18]

ECOMSA RES, S.L.

C. PABLO IGLESIAS, 76 - NAVE
POL. IND. GRAN VIA SUD, SECTOR PEDROSA
08908 L'HOSPITALET DE LLOB. - BARCELONA
T. +34 932 896 785 F. +34 932 896 786
ECOMSA@ECOMSA.COM
WWW.ECOMSA.COM
CIF: B58199191

rhPENERGY
PROTECCIÓN Y CONTROL DE LA ENERGÍA

Cliente / Customer
FACULTAD NAÚTICA DE BARCELONA UPC
CIF/NIF/VAT/TVA:

Oferta nº / Offer nr.	Fecha / Date	Cliente nº / Customer nr.
2618	26/09/2019	70001
Referencia / Reference		

Código / Code	Descripción / Description	Unid. / Units	PVP / Unit Price	Total
0	RE/ 30X265 SAC/ES 0R5 10% 280W	1,000	72,000000	72,00
0	RE/ 60X370 SAC/ES 0R873 10% 962W	1,000	86,000000	86,00
PLAZO: 2-3 DÍAS A PARTIR DE LA RECEPCIÓN DEL PEDIDO				
PORTES: DEBIDOS				
COBRO POR ANTICIPADO MEDIANTE TRANSFERENCIA BANCARIA				

Figura A. 15 Presupuesto de coste de resistencia de carga (cortesía de Ecoemsa) [17].